

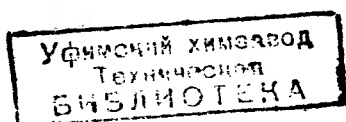
А. Я. ТУН

62/34
Т. 84

НАЛАДКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

*Издание второе,
переработанное и дополненное*

43956



«ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1970

6П2.1.081

Т 84

УДК 62-83:621.313.001.4

Тун А. Я.

Т 84 Наладка электрических машин электроприводов, М., «Энергия», 1970, изд. 2-е, переработанное и дополненное.

192 с. с илл.

В книге рассмотрены способы контрольных испытаний, измерений и снятия характеристик электрических машин электроприводов. Описаны методы определения маховых моментов, постоянных времени, приемы осциллографирования при пуске новых объектов или в процессе эксплуатации.

Книга предназначена для электротехнического персонала, выполняющего работы по наладке и обслуживанию электроприводов промышленных установок, а также может служить пособием для студентов высших и средних технических учебных заведений.

3-3-12

175-69

6П2.1.081

Тун Александр Яковлевич

Наладка электрических машин электроприводов

Редактор Е. А. Каминский

Обложка художника Н. П. Стрельцова

Технический редактор О. Д. Кузнецова Корректор И. С. Соколова

Сдано в набор 9/ХП 1969 г.

Подписано к печати 22/IV 1970 г.

Т-07518

Формат 84×108¹/₃₂

Бумага типографская № 2

Усл. печ. л. 10,08

Уч.-изд. л. 10,87

Тираж 25 000 экз.

Цена 55 коп.

Зак. 2566

Издательство „Энергия“, Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

**Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.**

Предисловие

Методы испытаний, измерений и снятия характеристик электрических машин в разрезе требований, предъявляемых при наладке электроприводов, начали освещаться в специализированной литературе с 1958 г. Книги по вопросам наладки стали справочным пособием широкого круга электриков-инженеров, техников и квалифицированных рабочих. Данная книга рассчитана на электротехнический персонал, знакомый с принципом действия электрических машин и имеющий практические навыки в обращении с измерительными приборами.

В книге, наряду с описанием принятой методики наладочных работ, даны некоторые новые рекомендации по проведению и оценке результатов испытаний электрических машин, изложены приемы электромонтажных работ, за которыми желательное наблюдение наладочного персонала, освещены вопросы специальных измерений и осциллографирования.

Попутно с описанием приемов наладки рассматриваются некоторые вопросы теории; для пояснения физических явлений приведены примерные характеристики и осциллограммы, определяющие свойства оборудования. Хотя эти данные представлены только в общем виде или относятся к отдельным типам оборудования, они могут помочь наладчику оценить результаты производимых им испытаний.

Книга представляет собой переработанное и дополненное издание книги А. Я. Туна и

А. О. Иванова «Наладка электрических машин электроприводов», выпущенной в 1963 г. В ней использованы также работы А. Я. Туна, опубликованные ранее [Л. 36 и др.].

Описываемые в книге методы наладки электрических машин основаны на опыте работы институтов Тяжпромэлектропроект и пуско-наладочных управлений системы Глав-электромонтаж, а также на результатах некоторых исследовательских работ института ВНИИЭлектроаппарат.

При подготовке даинной книги к изданию ценные указания были получены от редактора Е. А. Каминского, которому автор выражает глубокую благодарность.

Замечания и пожелания по материалам книги можно направлять по адресу: Москва Ж-114, Шлюзовая наб. 10, изд-во «Энергия».

Автор

Введение

Построение материально-технической базы коммунизма в нашей стране основано на повышении эффективности производства за счет всемерного использования достижений науки и техники. В области строительства новых и модернизации действующих промышленных установок все бóльшая роль отводится электрической части и особенно комплексу движущих агрегатов — электроприводу.

Электропривод за последние годы превратился в ведущую отрасль электротехники; он потребляет около $\frac{2}{3}$ вырабатываемой электроэнергии, и применительно к его требованиям развиваются электромашиностроение и аппаратостроение, создаются новые устройства контроля, измерения и счетно-вычислительной техники, усовершенствуются системы авторегулирования.

Повышение объема строительно-монтажных работ и усложнение электрооборудования определило создание специализированных пуско-наладочных управлений, а на крупных предприятиях — лабораторий автоматики. Основным профилем работ указанных организаций является наладка электроприводов. Наладочные работы, выполняемые в пусковой период или во время эксплуатации электроустановки, предназначенной для приведения в действие того или другого рабочего механизма, представляют совокупность операций по проверке, испытанию и настройке отдельных элементов привода и схемы его управления в целом.

Пуско-наладочные работы можно разделить на три этапа. К первому этапу относятся проверка и настройка отдельных аппаратов и машин с помощью временно собираемых схем, что рационально производить до окончания монтажа, а иногда даже до установки оборудования на рабочее место. Ко второму этапу следует отнести проверку схем первичной и вторичной коммутаций; эти работы выполняются вслед за окончанием монтажа. Третий этап включает наладочные работы по пуску электрических машин и настройке режимов управления в соответствии с проектом и особенностями исполнительного механизма.

В процессе эксплуатации с течением времени аппаратура и машины изнашиваются, изменяется настройка

режимов управления и в случае отсутствия надлежащего надзора создается опасность выходов из строя и даже аварий оборудования. Для обеспечения безотказности действия и повышения срока службы оборудования, помимо первоначальной наладки, требуются систематическое наблюдение, своевременное производство ревизии и повторной наладки электрических аппаратов и машин.

Наряду с механическим износом электрооборудования, развитие технологии производства сопровождается «моральным старением» систем управления и типов элементов электропривода. В промышленности широко практикуются замена морально устаревших аппаратов и машин, введение более интенсивных режимов их управления. При этом открывается возможность дальнейшего повышения производительности технологических агрегатов, улучшения качества продукции. Таким образом, между технологами, механиками и электриками происходит постоянное соревнование, направленное на усовершенствование и создание принципиально новых промышленных агрегатов.

К электрическим машинам электроприводов, наряду с крупными двигателями и генераторами, определяющими производительность мощных агрегатов, относятся разнообразные мелкие двигатели, осуществляющие, например, кратковременное перемещение какого-либо небольшого механизма, а также специальные машины устройств автоматики. В зависимости от величины, типа и назначения машины объем и сложность наладочных работ могут быть весьма различны. Вместе с тем следует иметь в виду, что, несмотря на многообразие электроприводов, их составные элементы имеют однородный характер. Это дает возможность разработать общую методику наладочных операций независимо от системы управления и рода механизма. Опыт эксплуатации промышленных установок показывает, что четкость и безотказность работы электропривода в значительной мере зависят от качества наладки его составных частей, т. е. каждой машины и каждого аппарата в отдельности. Выполнение наладочных работ требует от исполнителей практических навыков, аккуратности, знания свойств аппаратов и машин и, что не менее важно, умения выбрать рациональные методы регулировки и испытаний, позволяющие выполнять наладочные операции на современном высоком уровне и в короткие сроки.

Глава первая

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО НАЛАДКЕ ВСЕХ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

1-1. Программа наладочных работ

В практике наладки электрических машин принято ориентироваться на общую программу работ, содержащую перечень организационно-технических мероприятий, испытаний и измерений в порядке их рекомендуемой последовательности. Примерные программы работ можно найти в литературных источниках [Л. 2, 7, 9, 25] и служебных материалах специализированных организаций. В зависимости от величины, типа и назначения электрической машины объем и сложность наладочных работ могут быть весьма различны. Необходимый объем работ и выбор приемов испытаний должны определяться техническим персоналом.

Ниже приведена общая программа наладочных работ, необходимых для обеспечения безаварийного пуска и полного использования электрической машины.

1. Изучение технического и рабочего проектов электроустановки и выяснение общих требований, предъявляемых к данной электрической машине.

2. Подбор технической документации.

3. Внешний осмотр машины.

4. Составление календарного плана наладочных работ и списка необходимых испытательных и измерительных устройств.

5. Подготовка рабочего места с учетом требований техники безопасности.

6. Проверка механической части машины.

7. Измерение сопротивления изоляции и оценка необходимости сушки.

8. Измерение сопротивления обмоток постоянному току.

9. Испытание электрической прочности изоляции обмоток повышенным напряжением.

10. У коллекторных машин — проверка установки щеток.

11. Проверка взаимной согласованности выводов обмоток и схемы внутренних соединений.

12. Измерение электромагнитных постоянных обмоток, осциллографирование и другие специальные измерения при неподвижной машине.

13. Пробный пуск машины и контроль работы механической части на холостом ходу.

14. Снятие характеристик на холостом ходу.

15. Испытание машины и снятие характеристик под нагрузкой.

16. Проверка устройств маслосмазки подшипников и проверка вентиляции.

17. Исследование переходных процессов работы электропривода путем осциллографирования токов в обмотках, напряжений и скорости электрической машины.

Большинство пунктов приведенной программы работ относится к электрическим машинам всех видов; сложность, методика работ, естественно, зависят от величины и назначения электрической машины.

1-2. Изучение проекта и приближенная проверка правильности выбора электрической машины

Приступая к наладке электрической машины, необходимо определить, какие предъявляются к ней требования со стороны электропривода. Многие проектные организации не приводят в проектах расчетов и обоснований выбора определенных электроприводов. Вместе с тем нередко случаи, когда электриков обвиняют в том, что двигатель «не тянет», но многие проектировщики «про запас» предусматривают избыточно крупные электродвигатели. Поэтому следует заранее подобрать данные о рассчитанных или вероятных моментах сопротивлений, о допустимых люфтах, требуемой точности центровки и пр.

При отсутствии необходимой информации путем ознакомления с технологией работы и с конструкцией установки следует оценить:

а) максимально возможный статический момент сопротивления;

б) зависимость производительности привода от времени переходных процессов — разгона, реверса, торможения;

в) величину среднеквадратичной мощности по сравнению с номинальными данными машины;

г) специальные условия, например относительное значение махового момента привода, вибрации, влияние внешней среды и др.

Оценка пригодности и запаса надежности электрической машины должна базироваться на особенностях режима ее работы. В практике проектирования и стандартах предусматриваются три основных режима: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный. Фактические режимы работы обычно носят смешанный характер.

Продолжительный режим работы (S1) [Л. 16, 24] характеризуется редкими пусками и длительным пребыванием двигателей под нагрузкой при определенной скорости. В таком режиме работают: насосы, вентиляторы, мельницы, компрессоры, многие прокатные установки, транспортные механизмы, различные станки. При наладке приводов продолжительного режима обычно нет необходимости создавать интенсивный разгон, но в некоторых приводах (например у непрерывных прокатных станов) для снижения динамической посадки скорости требуется высокое быстродействие.

В общем случае для повышения к. п. д. на якоре или статоре двигателей следует поддерживать напряжение, близкое к номинальному. Специальное внимание должно быть уделено контролю температуры, вентиляции, смазке подшипников.

Расчет мощности и выбор двигателей продолжительного режима описаны в учебниках по электроприводу [Л. 24, 29 и др.]. При наладке для проверки выбора двигателей можно пользоваться простыми зависимостями

$$M_c = (0,5 \div 0,9) M_n; M_n = 975 \frac{P}{n}, \quad (1-1)$$

где M_c — номинальный момент сопротивления, $\kappa\Gamma\text{м}$;

M_n — номинальный момент двигателя, ($\kappa\Gamma\text{м}$), при скорости n , об/мин;

P — табличная мощность, $\kappa\text{вт}$.

Пусковой момент M_p при легком пуске (т. е. при отсутствии нагрузки в период разгона) целесообразно брать равным $(0,25-0,8)M_n$. При тяжелом пуске (разгон под нагрузкой) $M_p = (1-1,5)M_n$.

Время разгона t_p оценивается при условно неизменном моменте разгона M_p

$$t_p = 375 \frac{GD^2}{M_p - M_c}, \quad (1-2)$$

где GD^2 — маховой момент привода, $\kappa\Gamma\text{м}^2$.

При продолжительных режимах работы установки тепловой и максимальной зависимой защиты можно приблизить к номинальному току двигателя.

Следует отметить, что многие электроприводы продолжительного режима работы имеют переменную (перемежающуюся) нагрузку с циклически повторяющимся или переменным графиком. К таким приводам относятся, например, многие подъемники, строгальные станки, моталки, у которых время переходных процессов (разгона, торможения) мало по сравнению со временем установившегося хода. Эквивалентные токи (I_a) двигателей таких приводов рассчитываются по известным формулам среднеквадратичных величин (рис. 1-1)

$$I_a = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_k^2 t_k}{t_1 + t_2 + \dots + t_k}}; I_a \leq I_n, \quad (1-3)$$

где $I_1, I_2, \dots, I_k$ — усредненные значения токов за периоды времени $t_1, t_2, \dots, t_k$; I_n — номинальное значение тока.

Кратковременный режим работы (S2) [Л. 24] характерен для механизмов небольших перемещений. К таким механизмам относятся: задвижки, толкатели, клапаны, стартеры; всевозможные устройства поворота крупных рабочих площадок (например, оснований сцены в театрах, тупиковых кругов для электровозов, ворот шлюзов, вагоноопрокидывателей) и мелких барабанчиков (например командоаппаратов, светофильтров); устройства натяжения пружин, включения автоматов и множество иных операционных элементов.

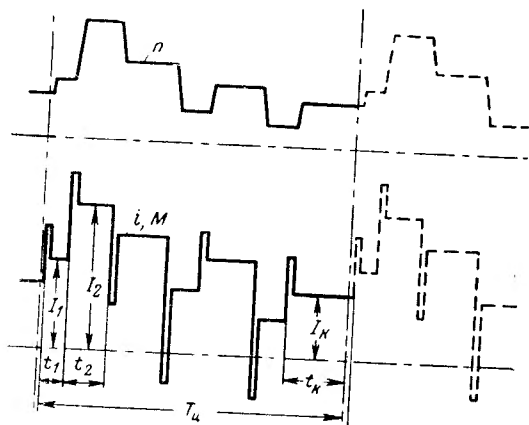


Рис. 1-1. График изменения скорости и тока электрического двигателя при сложном технологическом цикле.

n — скорость двигателя; M, i — электромагнитный момент и ток двигателя; $I_1, I_2, \dots, I_k$ — усредненные значения токов за периоды времени $t_1, t_2, \dots, t_k$; $T_{\text{ц}}$ — время цикла.

Двигатели таких крупных и мелких механизмов не успевают равномерно нагреться за время включения, и поэтому их номинальные мощности и токи не являются показательными. Для проверки выбора двигателя необходимо знать величины пусковых моментов двигателей по сравнению с максимально возможными моментами сопротивлений. Кроме того, при больших маховых моментах привода (приведенных к валу двигателя) следует проверить обмотки двигателя на допустимую энергию разгона.

Механизмы кратковременных перемещений во многих случаях сбалансированы, и их моменты сопротивлений в зависимости от состояния поверхностей сопрягаемых деталей, от смазки, температуры, наконец, от загрязнения могут изменяться в широких пределах. В этой связи для механизмов кратковременных перемещений особое значение имеет правильное определение коэффициентов трения скольжения и трения качения [Л. 42, 41, 29].

Помимо рассмотрения проектных и литературных данных для оценки пригодности двигателей желательно произвести измерения нагрузок на аналогичных электродвигателях. Следует учесть, что при

трогания с места, когда трение носит «сухой» характер, коэффициент трения может быть в 5—10 раз выше, чем на ходу.

В общем случае пусковые моменты $M_{\text{п}}$ электродвигателей механизмов кратковременных перемещений должны быть в 1,5—2 раза выше статических моментов трогания $M_{\text{п}} = 1,5 \div 2 M_{\text{тр}}$. Некоторые электродвигатели, входящие в технологическую линию, во избежание простоев производства должны обеспечить перемещение механизма даже при условии затвердевания смазки, заклинивания подвижных связей или иных непредвиденных перегрузках. У таких электропри-

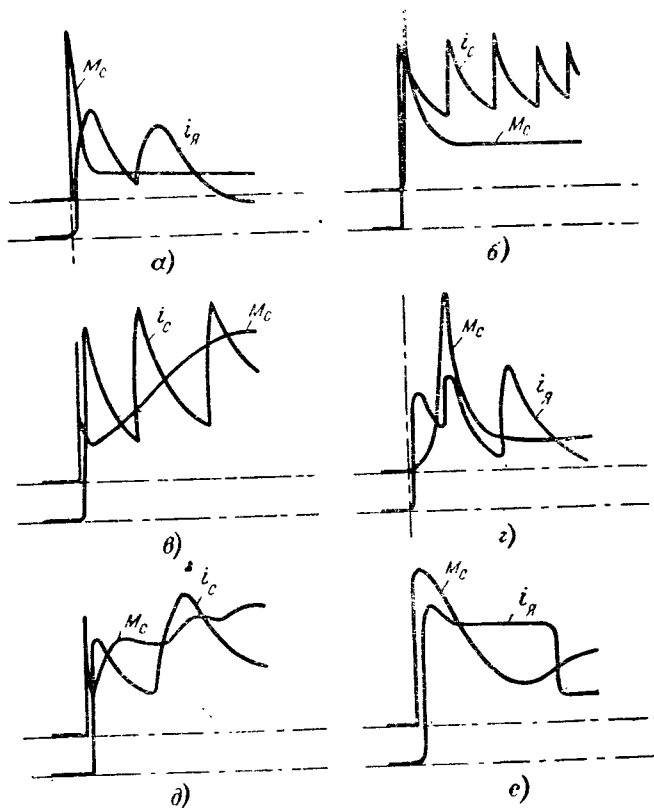


Рис. 1-2. Графики моментов сопротивления механизмов кратковременных перемещений и осциллограммы изменения токов двигателей.

а — рольганг (система Г—Д с контакторным управлением); *б* — коксовыткатыватель (асинхронный двигатель с фазным ротором); *в* — «пушка» доменной печи (асинхронный двигатель с фазным ротором); *г* — рудничный электровоз (постоянный ток, контакторное управление); *д* — шаровая мельница (синхронный двигатель); *е* — ворота шлюза (автоматическое поддержание пускового тока); M_c — момент сопротивления; $i_{\text{я}}$ — ток якоря; i_c — ток статора.

водов двигатели должны допускать создание пускового момента, превышающего обычные моменты трогания в 5 раз и более. Для иллюстрации на рис. 1-2 приведены графики моментов сопротивления некоторых механизмов, нанесенные на осциллограммы изменения токов двигателей.

Повторно-кратковременный режим работы (S3) [Л. 16, 24, 29] с частыми пусками, остановками, реверсами и изменением скорости характерен для механизмов кранов, перегружателей, экскаваторов, реверсивных прокатных приводов, реверсивных рольгангов и множества иных механизмов. При повторно-кратковременном режиме электрические машины во время включения нагреваются, а во время пауз остывают и температура всех их частей постепенно достигает среднего установившегося уровня.

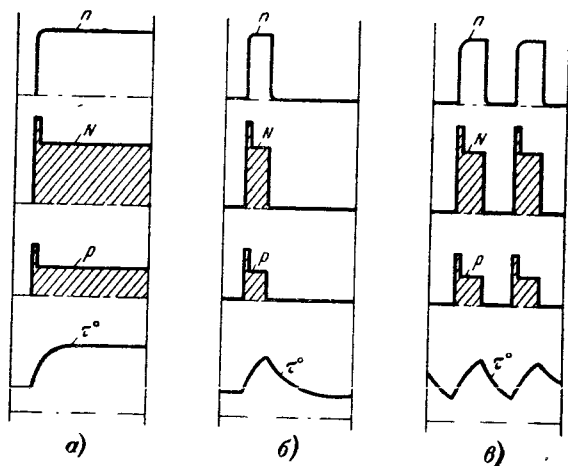


Рис. 1-3. Графики основных номинальных режимов работы электрических машин.

а — продолжительный; б — кратковременный; в — повторно-кратковременный.
 v — скорость; N — мощность; p — потери; τ^o — температура.

Следует иметь в виду, что в технических требованиях (в ГОСТ 183-55) на электрические машины нормировался простой повторно-кратковременный режим (S3) и машины испытывались на заводах-изготовителях только в этом режиме (рис. 1-3, в). Новый ГОСТ 183-66 предусматривает проведение испытаний в различных повторно-кратковременных режимах (см. ниже режимы S4—S8).

Нагрев машин зависит от выделяемых в них тепловых потерь и от теплоотдачи.

Как известно, потери в обмотках машин [Л. 1, 2, 8, 24] пропорциональны квадратам токов ($p_m \equiv I^2$), потери в стали зависят от индукции B , а следовательно, и от приложенного напряжения в дробной степени ($p_c \equiv B^{1.6 \div 1.8} \equiv U_c^{1.5 \div 2}$), потери в подшипниках и на коллекторе пропорциональны скорости ($p_{мех} \equiv n$); вентиляционные

потери, пропорциональные квадрату или кубу скорости ($p \equiv n^{2 \div 3}$), составляют обычно малую часть от общих потерь. Все виды потерь прямо пропорциональны времени ($p \equiv t$).

Теплоотдача и охлаждение машин, не имеющих принудительной вентиляции, в большой степени зависят от скорости вращения собственного вентилятора. Поэтому во время разгона и торможения, а особенно при стоянке охлаждение происходит менее интенсивно, чем при полной рабочей скорости (в расчетных зависимостях среднеквадратичных величин время разгона и торможения рекомендуется учитывать с поправочным коэффициентом 0,4—0,8, а время стоянки — с коэффициентом 0,25—0,5).

ГОСТ на электрические машины [Л. 16, 13] предусматривает нормируемую продолжительность включения ПВ 15, 25, 40, 60% с продолжительностью одного цикла не более 10 мин. Проверая выбор электрической машины, наладчик должен сопоставить графики нагрузки с каталожными (заводскими) данными машин при фактических величинах ПВ.

Развитие технологии агрегатов с повторно-кратковременным циклическим режимом работы характеризуется стремлением свести к минимуму время пауз, разгона и торможения. При этом во многих случаях электрические машины определяют производительность промышленных установок. Оптимальные по быстродействию режимы исследуются во многих книгах и статьях. В общем случае принято считать, что при разгоне, торможении и реверсе пусковой M_{π} и избыточный $M_{изб}$ моменты (рис. 1-4) должны быть неизменными. Это определяет неизменные величины ускорений ($a_p, a_t, a_{p\delta}$) и линейное изменение скорости n . Подобные режимы могут быть обоснованы и рассчитаны для двигателей постоянного тока [см. Л. 31], у которых момент пропорционален току якоря ($M = c\Phi I \equiv I$); выбор оптимальных режимов значительно сложнее в управляемых электроприводах переменного тока. Трудность состоит в том, что у двигателей переменного тока электромагнитные моменты и токи в большой степени зависят от величины скорости.

Приведенные замечания показывают, что настройка работы электрических машин, определяющих нередко производительность агрегатов, требует от наладчика вдумчивого подхода с использованием всех возможных расчетных и экспериментальных материалов.

Новый стандарт ГОСТ 183-66 на электрические машины ставит перед заводами-изготовителями требование обеспечить надежность работы при перемежающейся нагрузке (ПН) (режим S6)

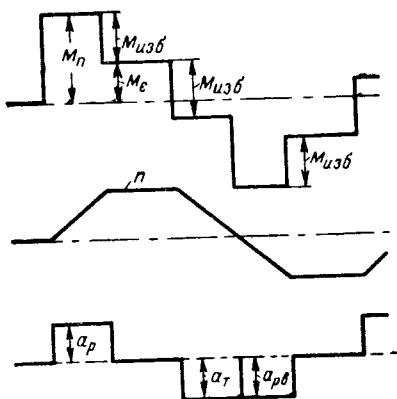
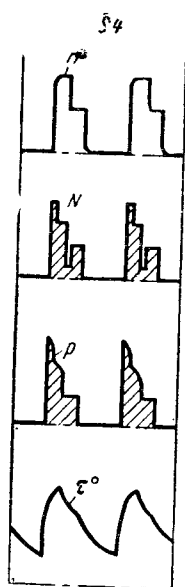
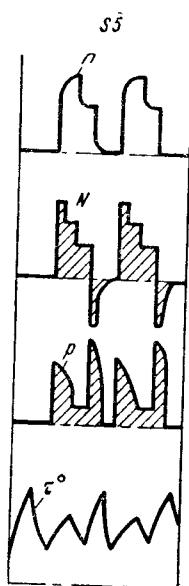


Рис. 1-4. Оптимальный по быстродействию режим работы двигателя.

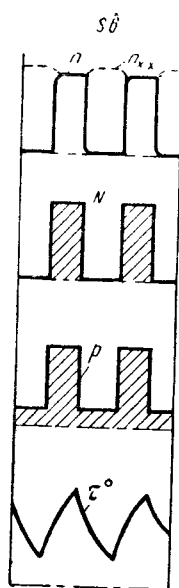
$M_{\pi}, M_{изб}, M_c$ — пусковой, избыточный и статический моменты; $a_p, a_t, a_{p\delta}$ — ускорения при разгоне, торможении и реверсе; n — скорость вращения.



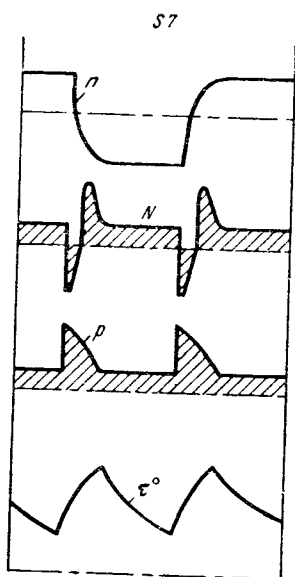
а)



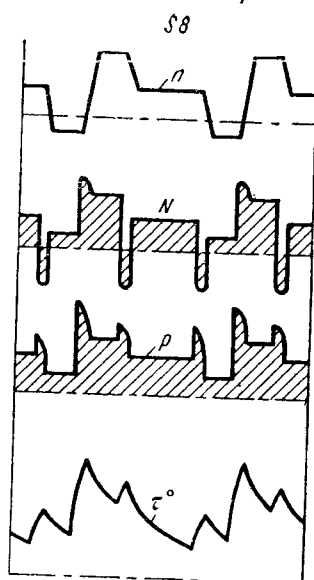
б)



в)



г)



д)

с длительностью цикла 10 мин и ПВ—15, 25, 40 и 60% (рис. 1-5,в). Заводам-изготовителям рекомендуется проверять машины также в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками с числом включений в час 30, 60, 120 и 240 при коэффициенте инерции F 1, 2; 1,6; 2,5 и 4 (рис. 1-5,а). Коэффициентом инерции F называется отношение махового момента привода (приведенного к валу двигателя) к маховому моменту самого электродвигателя

$$F = GD_{\text{п}}^2 / GD_{\text{д}}^2.$$

Продолжительность нагрузки на каждой из скоростей вращения согласовывается заказчиком с заводом-изготовителем.

В связи с расширением технических требований, предъявляемых к поставщикам, материалы испытаний, выполненных на заводах-изготовителях, должны позволить наладчикам оценивать электрические машины в режимах нагрузки, приближающихся к технологическим графикам.

1-3. Основные достоинства и недостатки систем управления электрических машин

1. Системы контакторного управления двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с фазным ротором. Системы контакторного управления в главных цепях (рис. 1-6) широко применяются для электроприводов кратковременного и продолжительного режимов [Л. 24, 29]. Ниже приводится перечень основных достоинств и недостатков систем контакторного управления.

Достоинства: а) относительно малая стоимость средств управления; б) простая надежная аппаратура, большой выбор аппаратуры; в) при редких пусках и реверсах достаточное быстродействие (измеряется десятими долями секунды); г) простота устройств защиты, малая вероятность возникновения аварийного состояния; д) не требуется высокой квалификации обслуживающего персонала.

Недостатки: а) неэкономичность при частых пусках; б) малая жесткость рабочих характеристик при пониженных скоростях (рис. 1-6,в, г); в) громоздкость аппаратуры, необходимость постоянного ухода за аппаратурой с заменой или ревизией деталей; г) система

Рис. 1-5. Графики повторно-кратковременных и перемежающихся номинальных режимов.

а — повторно-кратковременный номинальный (S4) с частыми пусками; б — то же, но с частыми пусками и электрическим торможением (S5); в — перемежающийся номинальный (S6) — основной; г — то же, но с частыми реверсами при электрическом торможении (S7); д — то же, но с изменением скорости вращения (S8); n — скорость; N — мощность; p — потери; t° — температура.

неприемлема при большом числе включений вследствие недостаточного быстродействия аппаратуры постоянно-го тока (время включения контактора 0,12—0,35 сек), перегрева катушек аппаратов переменного тока (кратность пускового тока $I_{\text{п}}/I_{\text{уст}} = 10 \div 18$), повышенного нагрева машин из-за толчков тока, быстрого износа аппаратуры и механизмов; д) практически неприемлема при необходимости автоматического поддержания заданной скорости и изменения скорости в пределах более чем 1:3.

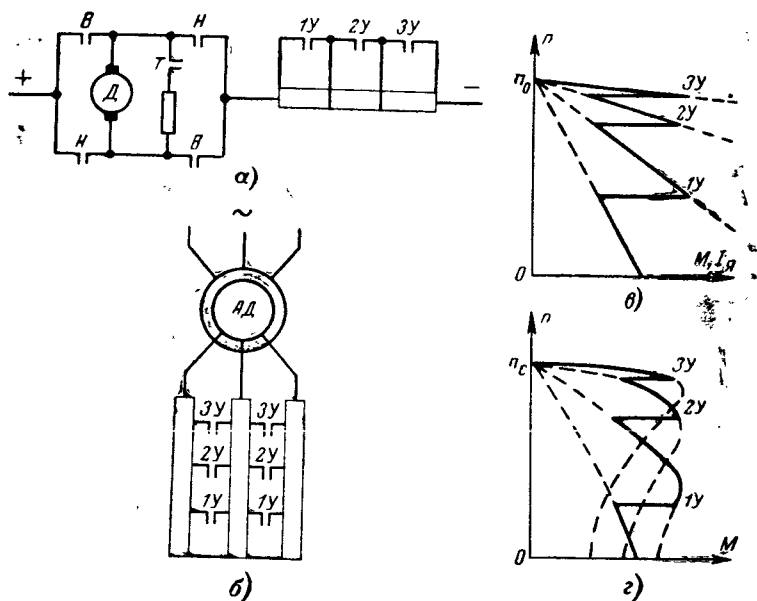


Рис. 1-6. Системы контакторного управления.

а — примерная схема электропривода постоянного тока; б — то же, но с двигателем переменного тока, имеющим фазный ротор; в — механические характеристики электропривода постоянного тока; г — то же, но электропривода переменного тока; В, Н, Т — реверсивные контакторы; 1У, 2У, 3У — контакторы ускорения; n_0 , n_c — скорость идеального холостого хода; M , $I_{\text{я}}$ — электромагнитный момент двигателя, ток якоря.

При наладке двигателей со ступенчатым контакторным управлением особое внимание должно быть уделено проверке их устойчивости к толчкам тока, к большим ускорениям и замедлениям.

2. Система «генератор — двигатель» (Г — Д). Системы Г — Д, позволяющие регулировать скорость дви-

гателей постоянного тока путем изменения возбуждения питающих их генераторов (рис. 1-7), применяются для электроприводов средней и большой мощности, требующих широкого регулирования скоростей или приводов напряженных повторно-кратковременных режимов. Из приводов, управляемых по системе Г—Д, можно назвать: строгальные станки, подъемники шахт и доменных печей, реверсивные главные приводы и механизмы прокатных станов, механизмы экскаваторов, различные приводы глубокого регулирования с заданными и жестко поддерживаемыми скоростями.

Достоинства: а) возможность плавной регулировки скорости в широких пределах до 20 при сохранении жестких внешних характеристик (рис. 1-7,б); б) экономичность — малые потери при переходных режимах благодаря отсутствию добавочных сопротивлений в главных цепях машин; в) возможность получения минимального времени переходных процессов путем создания оптимального графика тока; г) возможность осуществления плавного и эффективного торможения и реверса путем изменения возбуждения генератора без коммутационных переключений в главных цепях. Это достоинство является веским показателем при сопоставлении системы Г—Д с новейшими системами ионного и тиристорного управления.

Недостатки: а) увеличение капитальных затрат: три машины вместо одной; дополнительное помещение, специальный фундамент для двигателей и генератора; б) более сложная, чем при контакторном управлении, схема управления и сложная эксплуатация; в) повышенная опасность перенапряжений (при отключении контактора в якорной цепи) и перегрузок по току в случаях резкого изменения возбуждения генератора (вследствие малого сопротивления якорной цепи); г) возмож-

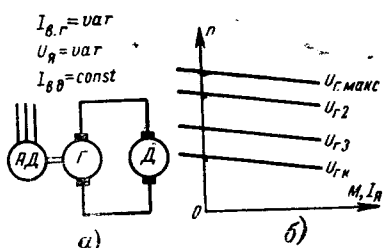


Рис. 1-7. Система «генератор—двигатель» (Г—Д).

а — схема цепи главного тока; б — механические характеристики электропривода; $U_{г.макс}$, $U_{г2}$, $U_{г3}$, ..., $U_{гк}$ — напряжения, поддерживаемые на якоре генератора; $I_{г.г}$, $I_{г.в}$ — токи возбуждения генератора и двигателя.

ность ползучего хода под действием остаточного магнетизма генератора.

Машины, работающие по системе Г—Д в интенсивных режимах, должны быть проверены на статическую и динамическую компенсацию реакции якоря и на величину допустимого изменения тока во времени di/dt . Особое внимание должно быть уделено настройке узлов токоограничения и токовой отсечки, а также гашению поля машин в случаях перенапряжений.

3. Система Г—Д с электромашиным управлением в цепях возбуждения. Электромашины (ЭМУ) используются в качестве возбудителей и подвозбудителей крупных генераторов и двигателей (рис. 1-8).

Системы с ЭМУ в цепях возбуждения обладают рядом достоинств: а) малая номинальная мощность управления (2—10 вт) и большая перегрузочная способность обмоток управления ЭМУ [допустимая длительная перегрузка $(7 \div 10)I_{н.упр}$] облегчают получение высокой чувствительности и поддержание заданного режима. В зависимости от особенностей привода может быть задано поддержание стабильной рабочей скорости, могут быть обеспечены определенные условия токоограничения, ограничений по напряжению или иным режимов; б) применение ЭМУ облегчает получение оптимальной диаграммы переходных процессов; в) большое быстродействие благодаря малой постоянной времени собственно ЭМУ

($T_0 = 0,09 \div 0,11$ сек) и устойчивости ЭМУ к перенапряжениям (при номинальном напряжении 230 в ЭМУ выдерживает перенапряжения до 300 и даже до 400 в); г) отпадает необходимость обслуживания контакторов в цепях возбуждения, повышается период планово-предупредительных ремонтов.

Недостатки: а) большое количество вращающихся машин обслуживает один двигатель, причем если двигатель включается на относительно короткое время (например, в системах Г—Д для поворота конверторов

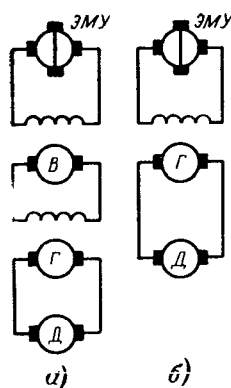


Рис. 1-8. Система Г—Д с электромашиным управлением в цепях возбуждения.

а — схема с ЭМУ в качестве подвозбудителя; б — схема с ЭМУ в качестве возбудителя.

максимальное время включения двигателя 20—30 сек), то все остальные машины (генератор, гонный двигатель, ЭМУ и его гонный двигатель) находятся в непрерывном вращении; б) сложность схем управления, относительная сложность первоначальной наладки и настройки режимов управления в процессе эксплуатации; в) необходимость ухода за несколькими машинами; г) опасность образования аварийных режимов при нарушении какой-либо цепи в сложной схеме управления. Однако при тщательной наладке опасность аварии практически удается устранить. В качестве примера можно привести опыт работы реверсивных прокатных станов, в которых ЭМУ используются в качестве подвозбудителей (рис. 1-9); схемы блюмингов, включающие по 10 машин, сотни элементов бесконтактной автоматики, безотказно работают круглосуточно с периодической ревизией не чаще 2—3 раз в месяц.

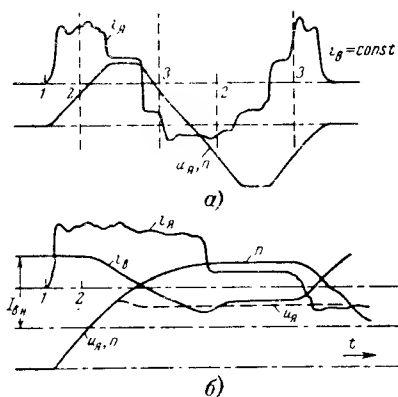


Рис. 1-9. Примерная осциллограмма электропривода реверсивного прокатного стана, управляемого по системе Г—Д.

а — разгон до основной скорости; б — разгон до максимальной скорости; 1 — начало разгона; 2 — вход металла в валки; 3 — выход металла из валков; i_a — ток якоря двигателя; u_a — напряжение якоря; n — скорость вращения; i_b — ток возбуждения двигателя; $I_{в.н}$ — номинальное значение тока возбуждения.

4. Система «электромашинный усилитель — двигатель» (ЭМУ—Д). Питание якорей двигателей от ЭМУ (рис. 1-10) практикуется в установках небольшой мощности до 5—10 квт, работающих с частым реверсированием. Система ЭМУ—Д успешно используется, например, для приводов перемещения электродов дуговых электрических печей.

Достоинства: а) высокое быстродействие (не влияет инерционность цепей возбуждения генератора или время включения контакторов); б) малая мощность управления (2—10 вт); в) экономичность (нет сопротивлений в якорных цепях); г) износоустойчивость (нет

часто включаемых аппаратов; сглажены толчки тока).

Недостатки: а) наличие трех вращающихся машин вместо одной; б) относительная сложность первоначальной настройки; в) необходимость периодической подрегулировки в процессе эксплуатации.

5. Система регулирования скорости асинхронных двигателей путем изменения частоты (Д — СГ — АД).

Отсутствие подвижных контактов и высокая надежность асинхронных двигателей АД с короткозамкнутым ротором послужили основанием для их

применения в управляемых многодвигательных приводах рольгангов, быстроходных приводах прокатных клеток и в различных иных механизмах. В данных приводах АД питаются от синхронных генераторов СГ, скорость которых регулируется с помощью гонных двигателей постоянного тока (рис. 1-11). Для регулирования скорости двигателя постоянного тока обычно используется управляемый выпрямитель, а иногда система Г—Д, описанная выше.

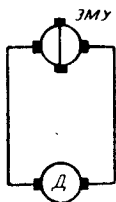


Рис. 1-10. Система «электромашинный усилитель—двигатель».

Приводные двигатели не показаны.

Частота и величина напряжения СГ изменяются пропорционально их скорости; благодаря этому регулировка возбуждения СГ становится не обязательной.

Достоинства систем Д — СГ — АД состоят в следующем: а) возможность быстрого изменения скорости

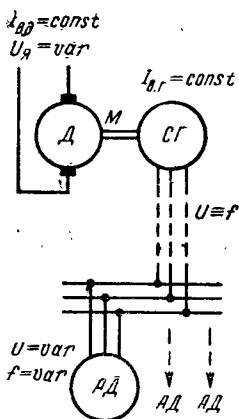


Рис. 1-11. Система регулирования скорости асинхронных двигателей путем изменения частоты.

АД — управляемые асинхронные двигатели; СГ — синхронный генератор; Д — приводной двигатель постоянного тока, регулируемый путем изменения напряжения якоря ($U_{\text{я}} = \text{var}$); $i_{\text{в.г.}}$, $i_{\text{в.д.}}$ — ток возбуждения генератора и двигателя; U , f — напряжение и частота сети, питаемой от синхронного генератора.

АД без применения контакторно-релейной аппаратуры; б) повышение плавности регулирования скорости и снижение тепловых потерь при переходных режимах.

К недостаткам системы управления следует отнести: а) наличие дополнительного СГ и гонного двигателя постоянного тока на полную мощность привода; б) относительную сложность системы управления; в) необходимость дополнительного ухода за синхронным генератором и его приводным двигателем постоянного тока; г) относительную сложность настройки защиты АД.

6. Система «управляемый ионный выпрямитель — двигатель» (УРВ—Д). Управляемые ртутные выпрямители и тиристоры нашли широкое применение для питания якорей (системы УРВ—Д, рис. 1-12) и обмоток возбуждения двигателей постоянного тока средних и больших мощностей.

Достоинства: а) высокое быстродействие (практически безынерционное управление); б) получение жестких рабочих характеристик в широком диапазоне скоростей без дополнительных вращающихся машин, снижение капитальных затрат на дополнительные машины и фундаменты к ним, отсутствие шума, уменьшение трудоемкости обслуживания по сравнению с системами Г—Д;

в) небольшая мощность управления (в особенности при использовании электронных или полупроводниковых регуляторов); г) повышение к. п. д.; д) возможность питания трансформатора привода от сети высокого напряжения.

Недостатки: а) сложность силовых цепей, в особенности у реверсивных электроприводов; б) сложность и громоздкость устройств защиты от обратных зажигания и перегрузок; в) относительная сложность систем сеточного управления и регуляторов; г) необходимость

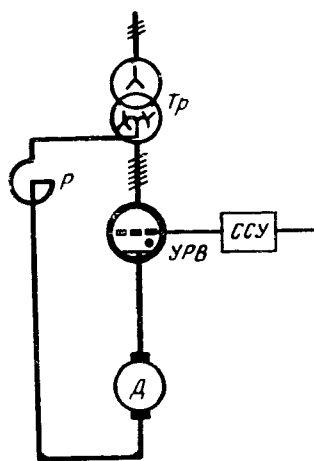


Рис. 1-12. Система «управляемый ионный выпрямитель—двигатель».

Д — двигатель; УРВ — управляемый выпрямитель; ТР — трансформатор; Р — реактор; ССУ — система сеточного управления.

квалифицированного обслуживания; д) недостаточная надежность некоторых типов УРВ; е) у сборных УРВ необходимость систематического контроля отсутствия паров ртути в помещении; необходимость специальных помещений и устройств для переборки и формовки (например, в прокатных цехах); и) пониженный коэффициент мощности питающей линии, в особенности при глубоком регулировании скорости; к) необходимость поддержания температуры вентилях в определенных пределах (с помощью системы водяного или воздушного охлаждения, а также анодных грелок); л) пульсации токов в якорной цепи частично влияют на нагрев и жесткость характеристик электродвигателей.

7. Система «тиристорный выпрямитель — двигатель». Создание мощных управляемых полупроводниковых выпрямителей-тириستоров определило существенный скачок в качественном развитии электроприводов. В Советском Союзе и за границей десятки специализированных организаций ведут работы по дальнейшему усовершенствованию тириستоров и их применению для электроприводов, в которых ранее применялись системы Г — Д и УРВ — Д. Тиристоры используются также в качестве регулируемых сопротивлений и бесконтактных коммутационных элементов. Структурные схемы включения тиристоров подобны схемам включения управляемых ртутных выпрямителей (см., например, рис. 1-12).

Основные достоинства электроприводов с тиристорами следующие: а) высокое быстродействие; б) высокий к. п. д. по сравнению со всеми системами, включая УРВ — Д (падение на вентильном переходе не более 1 в; у РВ — 22 в); в) небольшая мощность управления (до 5 в, 5—50 ма); г) компактность, устойчивость к тряске, устойчивость к температурным влияниям; д) возможность питания трансформатора привода от сети высокого напряжения.

Недостатки: а) чувствительность к перегрузкам по току, сложность защиты тиристоров от коротких замыканий во внешних и внутренних цепях преобразователей; б) чувствительность к перенапряжениям; в) относительная сложность систем управления; д) при больших нагрузках необходимость принудительного охлаждения и фильтрации охлаждающего воздуха; е) расхождение физических свойств и характеристик управления тиристоров одинаковых типов; е) отсутствие

возможности испытаний перед введением в эксплуатацию.

8. *Асинхронно-вентильный каскад*. Из различных систем регулирования скорости асинхронных двигателей с фазным ротором следует отметить вентильный каскад (АВК), основанный на изменении опорной э. д. с. ротора (рис. 1-13).

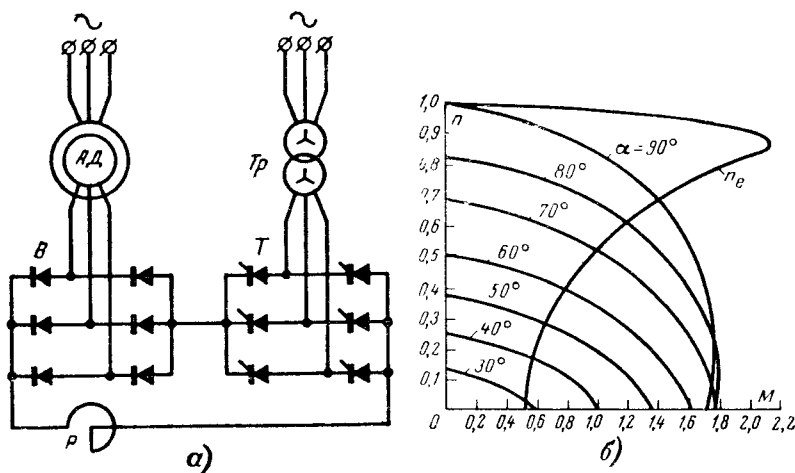


Рис. 1-13. Асинхронно-вентильный каскад.

а — схема цепей главного тока; б — механические характеристики при разных углах открывания управляемых выпрямителей; АД — регулируемый асинхронный двигатель; Т, В — управляемый и нерегулируемый выпрямители; Тр — трансформатор; Р — реактор; n , M — скорость и момент двигателя; α — угол открывания УКВ; n_e — характеристика АД (естественная) при закороченном роторе.

Системы АВК разработаны для приводов шахтных подъемов, регулируемых транспортеров, некоторых электровозов. По сравнению с электроприводами, в которых применяются схемы Г—Д или Д—СГ—АД, они имеют следующие достоинства: а) возможность бесконтактного плавного регулирования скорости асинхронного двигателя без применения дополнительных электрических машин; б) достаточно высокие к. п. д.; в) жесткие механические характеристики в широком диапазоне регулирования скоростей (рис. 1-13, б); г) небольшая мощность управления; д) возможность рекуперации (возвращения) энергии в сеть при тормозных режимах и при отрицательных моментах сопротивлений.

Недостатки: а) сложность схемы силовых цепей и схемы регулирования; б) относительная сложность расчета и настройки системы, необходимость квалифицированной эксплуатации; в) некоторое снижение верхнего предела рабочей скорости; г) в цепях ротора имеют место высокие рабочие напряжения и большие токи, затрудняющие подбор управляемых вентилях.

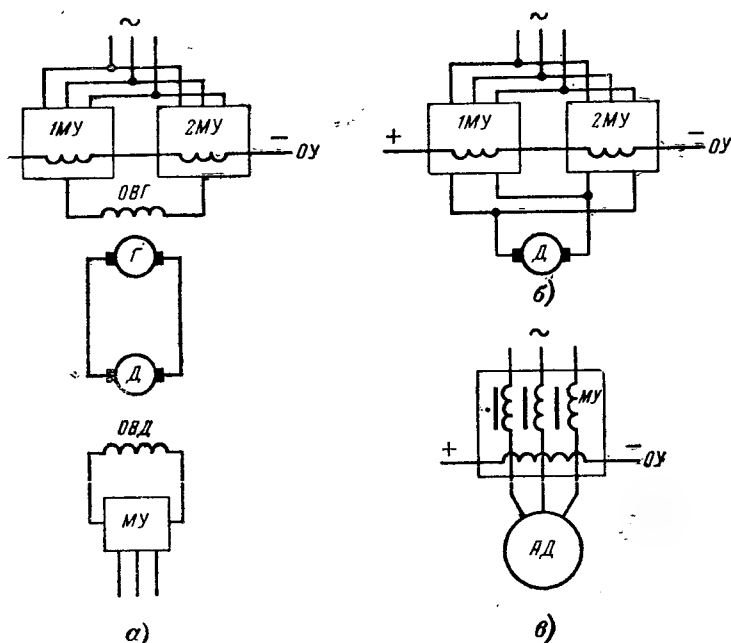


Рис. 1-14. Системы управления с силовыми магнитными усилителями (МУ).

а — обмотки возбуждения машин системы Г—Д питаются от МУ, блок из двух МУ (1МУ и 2МУ) обеспечивает изменение полярности ОБГ; б — якорь реверсивного двигателя малой мощности питается от блока 1МУ—2МУ; в — дроссели подмагничивания МУ в цепях статора АД; ОУ — обмотки управления.

9. Система «магнитный усилитель — двигатель» (МУ—Д). Силовые магнитные усилители (МУ) мощностью до 10 кВт широко используются для регулирования напряжений и токов в цепях электрических машин (рис. 1-14). Магнитные усилители не потеряли своего значения даже после освоения тиристорных преобразователей и применяются в проектах сотен разнообразных электроприводов благодаря своим достоинствам.

Достоинства: а) высокая надежность по сравнению со всеми иными системами управления; б) не изнашиваются и практически не нуждаются в уходе; в) не изменяют свои характеристики во времени; г) дают возможность контролировать большое количество потенциально не связанных сигналов (по току, по скорости, по напряжению и другие); д) при многокаскадных схемах требуют малой мощности управления.

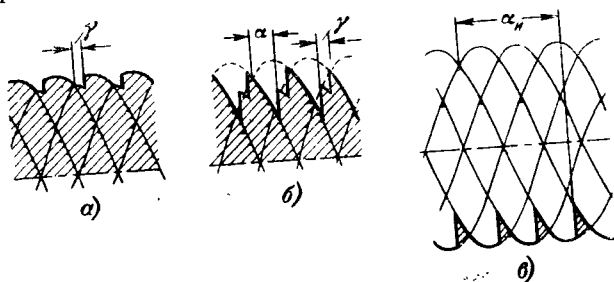


Рис. 1-15. Кривые выпрямленных напряжений в системе УКВ—Д.

а — шестифазное выпрямление, рабочий режим, угол регулирования $\alpha=0$; б — то же, но $0 < \alpha < 90^\circ$; в — инверторный режим $\alpha_n > 90^\circ$; γ — угол коммутации.

Недостатки: а) низкий к. п. д.; б) большая инерционность (для увеличения быстродействия приходится создавать источники питания повышенной частоты, вводить балластные сопротивления большого потребления и завышать рабочие напряжения); в) сложность электромагнитных процессов в системе и как следствие — сложность расчетов оптимальных режимов управления. Относительная сложность получения желаемых рабочих характеристик; г) большой вес, громоздкость, большой расход меди и высококачественной трансформаторной стали.

Можно отметить, что в современных системах авторегулирования наибольшее применение находят малогабаритные МУ, используемые для суммирования и преобразования сигналов. Такие МУ на промышленной или повышенной частоте применяются также для управления двигателями малой мощности (рис. 1-14, б, в).

Приведенная выше (в пп. 6—9) краткая характеристика систем бесконтактного управления на полупроводниковых и магнитных усилителях показывает, что они

позволяют получить плавное и устойчивое регулирование скорости двигателей без применения силовых генераторов постоянного или переменного тока. При проектировании современных электроустановок стремятся обойтись без систем Г—Д и Д—СГ—АД. На многих объектах, находящихся в эксплуатации, силовые генераторы также заменяют статическими источниками питания. Основная роль в модернизации электроприводов отводится тиристорным преобразователям.

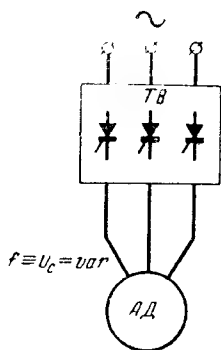


Рис. 1-16. Структурная схема регулирования скорости асинхронного двигателя с помощью тиристорного преобразователя частоты.

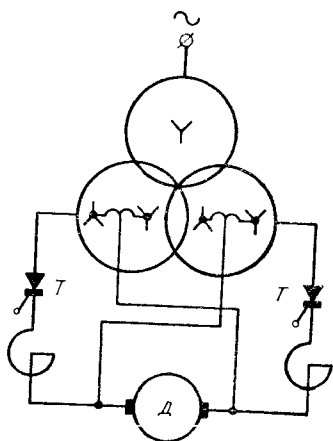


Рис. 1-17. Схема реверсивного тиристорного преобразователя (перекрестная шестифазная схема с уравнительными реакторами).

Следует отметить, что распространение выпрямителей ограничивалось из-за значительных пульсаций напряжения при глубоком регулировании скорости (рис. 1-15, а, б). В последние годы построены трансформаторы с переключателями на большое число ступеней, что позволяет получить разные выпрямленные напряжения U_α и в широких пределах изменять скорость двигателя при относительно небольших углах регулирования α .

Подготавливаются промышленные тиристорные установки средней и большой мощности для регулирования скорости асинхронных двигателей путем изменения частоты (рис. 1-16). Вводится в эксплуатацию тиристор-

ный реверсивный привод прокатного стана (блюминга) мощностью 25 Мвт. В настоящее время для реверсивных двигателей требуется применение двух комплектов выпрямителей (рис. 1-17). Но уже известны полупроводниковые элементы, обладающие двусторонней управляемой проводимостью. Их освоение создаст возможность нового качественного скачка в развитии управляемых электроприводов.

1-4. Подбор технической документации, подготовка аппаратуры и рабочего места

Основная техническая документация. После изучения проектных материалов по электроприводу следует подобрать и рассмотреть основную техническую документацию по электрической машине: а) табличные—паспортные данные; б) каталожные данные; в) схему внешних соединений; г) общий вид в разрезе; д) формуляр завода-изготовителя; е) данные приемосдаточных испытаний; ж) материалы о сушке машины или заключение о возможности включения без сушки; з) чертежи на установку машины; и) акт или протокол ревизии, выполненной монтажной организацией; к) бланки протоколов наладки.

При наладке сложных электрических машин требуется подобрать технические отчеты специализированных организаций с описанием особенностей и данными типовых испытаний машины. Поскольку на промышленных объектах, как правило, имеется значительное количество машин одинаковых типов, на отдельные машины требуются только данные заводских испытаний и ревизии, выполненной при монтаже. Техническая документация по электрической машине должна быть согласована с действующими Государственными стандартами (ГОСТ) и дополнительными техническими условиями (ТУ).

Основным стандартом на электрические машины мощностью более 50 вт служит ГОСТ 183-66, который включает разделы: 1. Технические требования, 2. Методы испытаний, 3. Маркировка и 4. Документы к машине. К машинам электроприводов относится также ряд специальных стандартов: ГОСТ 186-52 — «Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 0,6 до 100 кВт. Технические условия»; ГОСТ 9362-60 — «Элек-

тродвигатели трехфазные асинхронные мощностью от 100 до 1000 квт. Технические требования»; ГОСТ 185-63 — «Электродвигатели трехфазные асинхронные крановые и металлургические»; ГОСТ 10283-62 — «Электродвигатели трехфазные асинхронные рольганговые»; ГОСТ 7217-66 — «Электродвигатели трехфазные асинхронные мощностью 100 вт и выше. Методы испытания»; ГОСТ 184-61 — «Электродвигатели постоянного тока металлургические и крановые»; ГОСТ 2582-66 — «Машины электрические постоянного и пульсирующего тока тяговые. Технические требования».

Справочные данные и характеристики машин могут быть найдены в хорошо скомпонованных справочниках [Л. 15].

Подбор электроизмерительной аппаратуры и испытательных устройств имеет особое значение в производстве наладочных работ. Списки обычной аппаратуры можно найти в различных справочниках; ниже приведены типы некоторых специальных аппаратов, рекомендуемых наладочным участкам.

1. Мегомметры для проверки изоляции*: а) тип М1101М, напряжение 500 и 100 в, пределы измерений 1000 ком — 200 Мом, вес 3,2 кг; б) тип М4122, 2500 в, 0,5—10 000 Мом; в) тип М1102, 500 в, 1000 ком — 200 Мом, вес 5 кг — для сырых и насыщенных пылью рабочих участков.

2. Мосты постоянного тока одинарные (Уитстона) для сопротивлений средних и больших величин: а) малогабаритный типа Р353, пределы измерений 0,2— $5 \cdot 10^3$ ом, погрешность $\pm 1-5\%$, вес 1,3 кг; б) малый мост типа ММВ, $5 \cdot 10^{-2}$ — $5 \cdot 10^4$ ом, погрешность $\pm 2-3\%$, вес 0,9 кг; в) универсальный мост типа Р316, 1×10^{-5} — 10^6 ом, погрешность 0,5—0,2%, вес 6 кг.

3. Мосты постоянного тока двойные (Томсона — Уитстона) для измерения малоомных сопротивлений: а) одинарно-двойной мост типа МОД61, $1 \cdot 10^{-5}$ — 10^2 ом, основная погрешность 0,05—2%; б) одинарно-двойной мост типа МТВ, $1 \cdot 10^{-6}$ — 10^6 ом, погрешность 0,2—3%.

4. Мосты переменного тока для измерения индуктивности, емкости и диэлектрических потерь: а) переносный универсальный типа Р577, напряжение 220 в, 127 в, 50 гц для измерения: емкости от 1 пф до 1100 мкф, погрешность $\pm 1\%$; индуктивности от 1 мкгн до 110 гн, погрешность $\pm 1\%$; сопротивления постоянному току от 0,1 ом до 11 Мом, погрешность 1,5%; вес 7 кг; б) переносный МД—16 с эталонным конденсатором на рабочее напряжение 5—10 кв. Пределы: по емкости от 30 пф до 0,4 мкф, $\pm 0,5\%$; по углу диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) от 0,05 до 6%, вес 17 кг.

* Наименования приборов и аппаратов, а также их технические характеристики приведены по данным и терминологии каталогов.

5. Омметры: а) омметр (карманный) типа М57, 20—1 500 ом, (вне класса), питание от батарей КБС-0,35, вес 0,3 кг; б) омметр типа М371, 100 ом — 10 Мом, 1,5%, вес 0,5 кг; в) омметр многопредельный типа М218; 0,1—100 ом, 100 ком, 10 Мом, класс 1,5—2,5, питание от сети 50 гц или от сухих элементов, вес 0,5 кг.

6. Фазоуказатели: а) фазоуказатель типа И517 для определения чередования фаз, 40—500 гц, 50—500 в, вес 0,2 кг; б) фазоуказатель универсальный типа Э500 для определения cos φ и других измерений, 50 гц, 110—380 в.

7. Векторметр типа Ц50, 40—50 гц; 0,15—300 в; 0,01—5 а, $\alpha=0\div 360^\circ$.

8. Частотомер транзисторный типа Ф433/3, 10 гц — 1 000 кгц.

9. Стробоскоп типа СТ-4 от 100 до 30 000 об/мин (с неоновой лампой для подсвечивания).

10. Тахометр многопредельный, механический 20—3 000 об/мин.

11. Указатель полярности обмоток типа М227, чувствительность 18 мв, питание от батарей КБС 4,1 в, вес 0,5 кг.

12. Индикатор искрения типа ИИ-1 для оценки коммутации щеток (изготовитель Омский институт ОМИИТ).

13. Милливеберметр типа М119 для измерения магнитных потоков с помощью индикаторных катушек.

14. Указатель напряжения типа УНН-90, 120—500 в, 50 гц, 0,08 кг.

15. Аппараты для проверки состояния обмоток электрических машин локационным способом типа ЕА1 (или другие); служат для обнаружения замыканий в обмотках электрических машин и для выявления мест с ослабленной изоляцией.

16. Осциллографы электронные: а) однолучевой на низкие частоты типа С1-30, б) однолучевой с послесвечением на низкие частоты типа С1-19, в) двухлучевой с послесвечением типа С1-18.

17. Осциллографы светолучевые (шлейфовые): а) 12-канальный типа Н105, запись на фотоленте 35—120 мм, скорость ленты 0,5—1 000 мм/сек, вес 30 кг, для работы с гальванометрами типов М004 и М1013; б) 8-канальный типа Н102, запись на фотоленте 35 мм, скорость ленты 1—500 мм/сек, для работы с гальванометрами типов Н135, МОВ2 и Д1, вес 33 кг; г) самопишущий быстродействующий прибор типа Н320-3; скорость движения диаграммы 0,02—5 мм/сек, прибор трехканальный, потребление регистраторов — миллиамперы.

18. Клещи электроизмерительные типа Ц91 для измерения переменных токов в сетях до 600 в, 2—500 а, 50 гц, вес 0,6 кг.

19. Стрелочные многопредельные приборы: а) вольт-амперметр типа М253, многопредельный постоянного тока, 0,75 ма—30 а, 0,015—600 в, класс 0,5, вес 1,8 кг; б) ампервольтметр типа Ц20, погрешность $\pm 4\%$, 0,3—750 ма постоянного тока, 0,6—600 в постоянного и переменного токов; 5—500 ком, вес 1,6 кг; в) комбинированный прибор типа Ц56/1, 0,3 ма—6 а постоянного тока, 1,5—6 а переменного тока, 75 мв—900 в постоянного тока, 0,3—900 в переменного тока, 5 ком—5 Мом.

20. Электронные вольтметры: а) вольтметр на полупроводниках типа ВК7-9, 0,1—500 в постоянного тока, 1—1 000 в переменного тока, 20 гц—700 Мгц, с делителем до 20 кв, при рабо-

те в качестве омметра — 100 ом — 100 Мом; б) вольтметр ламповый типа Ф564, многопредельный с емкостным и потенциометрическим входом 0,3 Мом, 10 мв — 300 в, 45—10 000 гц.

При монтаже электрических машин и для различного рода измерений на других частях электропривода рекомендуется приобрести некоторые специальные инструменты: 1) индикатор часовой с точностью отсчета до 0,01 мм; 2) виброметр; 3) уровень прецизионный; 4) линейки проверочные стальные; 5) щуп малый длиной 100 мм с набором пластин толщиной 0,05—1 мм; 6) щуп большой длиной 350—600 мм с набором пластин; 7) штангельциркуль; 8) микрометры; 9) микрометрический штихтмас; 10) пружинный динамометр до 2 кг для проверки нажатия щеток и до 20 кг для проверки нажатия контактов.

Подготовка рабочего места. Помещение, в котором начинаются работы по наладке электропривода, должно быть освобождено от неиспользованного оборудования и строительных материалов, а затем очищено от мусора и вымыто. Все отверстия в полу должны быть закрыты, вращающиеся и токоведущие части машин огорожены и защищены от случайного прикосновения. В период производства работ должно включаться общее и местное освещение; для осмотра оборудования следует приспособить переносные лампы или фонари [Л. 9, 19, 36].

Перед машинными агрегатами и движущимися механизмами, на панелях управления и над переносным столом с измерительной аппаратурой следует вывесить предупреждающие плакаты: «Стоять — опасно для жизни», «Под напряжением». Во избежание ошибочных действий необходимо пользоваться плакатами: «Работать здесь», «Не включать — работают люди» и кроме того, предусмотреть блокировки разъединителей, рубильников, кнопок управления.

Пуск электрических машин требует предварительного оформления определенных документов и согласования совместных работ с электромонтажным персоналом и с механиками.

Во всех наладочных работах необходимо руководствоваться «Правилами техники безопасности при производстве электромонтажных работ» [Л. 19], ведомственными правилами, местными правилами и инструкциями, учитывающими особенности объекта и исполняемых работ. Некоторые специальные вопросы техники безопасности отмечены ниже, а также рассмотрены в § 1-10 и 3-5.

С особой осторожностью следует отнестись к вопросу о защитном заземлении. Корпуса электрических машин, стоящих на фундаментных плитах, должны иметь надежное заземление при любых видах испытаний. Измерительные приборы, как правило, выпускаются в пластмассовых корпусах из изоляционного материала. Однако ползунковые реостаты, поворотные трансформаторы (РНО), осциллографы имеют металлические корпуса; при повреждениях внутри аппарата на этих коробах может появиться напряжение, опасное для наладчика.

В связи с повышенной опасностью к наладочным работам может допускаться только обученный и проверенный персонал, обладающий не только необходимыми знаниями, но и высокой производственной дисциплиной. Поскольку, несмотря на возможную близость напряжения, наладчикам приходится работать без резиновых перчаток, для обеспечения безопасности необходимо принимать специальные меры. В связи со сложностью и разнообразием наладочных работ

нельзя дать единых рекомендаций о методах защиты. Основные положения сводятся к следующему.

Во время работы с осциллографами и иными приборами питаемыми от сети или имеющими рабочее напряжение более 60 в, главным является надежная изоляция самого наладчика. Необходимо пользоваться изоляционным помостом (решеткой) или резиновым ковриком; помост и коврик должны быть сухими и очищенными от пыли.

Обувь, одежда и руки наладчика должны быть сухими; следует пользоваться одеждой с длинными рукавами, желательно с застежками; у женщин должны быть брюки или чулки.

Вся аппаратура должна располагаться на изолирующем деревянном столе, покрытом гетинаксом или электрокартоном; реостаты и другие регулируемые устройства следует закрепить. Металлические кожухи аппаратов, не нуждающихся в экранировке, как правило, заземлять не следует. Однако в ряде случаев при подключении аппаратов к сети, при работе в сырых помещениях, при близком нахождении лиц, не знакомых с условиями наладки (например, когда в помещении находятся строители), необходимо заземлять корпус всех находящихся под напряжением устройств.

Регулирующие устройства, стоящие под столом и около него, должны быть ограждены от случайного касания (для этого можно пользоваться сухими досками, асбоцементными листами, электрокартоном, ковриками). Ограждения должны быть закреплены.

Обращается внимание на то, что вопросы безопасности являются специальными и в данной книге рассматриваются в самом общем виде.

1-5. Внешний осмотр, проверка механической части и общие сведения о монтаже электрических машин

При внешнем осмотре проверяются:

а) соответствие проекту и механизму паспортных данных машины;

б) наличие всех деталей;

в) чистота поверхности обмоток, деталей и корпуса;

г) состояние изоляции обмоток и их выводов;

д) в машинах постоянного тока состояние коллектора, щеткодержателей и щеток; в машинах с токосъемными кольцами состояние колец, щеток, механизма, замыкающего накоротко кольца;

е) правильность внутренних соединений обмоток (по возможности) с составлением для крупных машин исполнительных схем.

Проверку механической части машин обычно производит монтажный персонал; желательно, чтобы наладчики электроприводов приняли участие в этих работах и уделили внимание следующим вопросам.

1) При подшипниках скольжения с кольцевой смазкой следует убедиться в наличии на валу колец, отсутствии на них вмятин или заусенцев и в свободном их движении. Разъемные кольца должны быть сочленены без каких-либо смещений, а головки скрепляющих винтов утоплены ниже поверхности колец. В подшипниках с дисковой смазкой необходимо проверить свободную посадку скребка и чистоту лабиринтов для стока масла. Следует проверить наличие и уровень масла в подшипниках, выяснить его сорт. Необходимо прове-

рить состояние уплотнений, препятствующих вытеканию масла из подшипников.

2) При подшипниках качения следует проверить правильность их сборки и заправку смазки. Состав смазки указывается заводом—изготовителем машины; рекомендуемое заполнение должно составлять 30—50% объема камеры подшипника [Л. 9, 11, 12].

3) При наладке машины, прошедших ревизию, следует хотя бы выборочно проверить затяжку болтов, крепящих крышки подшипников, боковые щиты машины, главные и дополнительные полюса. Затяжка болтов не проверяется, если головки болтов окрашены вместе с машиной, так как краска служит своего рода гарантией завода-изготовителя или электроремонтного цеха. Болты должны быть затянуты ключом с максимально допустимым для данных болтов усилием. При проверке крупной машины необходимо ознакомиться с актом ее ревизии [Л. 10, 14, 25].

4) Машины малых габаритов проворачиваются вручную, а большие — с помощью лома или монтажного крапа. При этом путем выслушивания проверяют, не происходит ли внутри каких-либо задеваний, ударов, царапанья. Работа подшипников также проверяется «на слух», и просматривается ход смазочных колец.

Одновременно с проворачиванием искусственно создается осевой разбег вала и проверяется, не возникают ли при этом задевания между вентилятором и крышкой, между щетками асинхронных двигателей и фазными изоляционными дисками, петушками якоря машины и поводками щеток, а также заклинивание смазочных колец и т. п. Величина осевого разбега при подшипниках скольжения, в зависимости от конструкции и величины машины оставляет обычно 1—4 мм.

5) В машинах, собираемых на месте монтажа, проверяется с помощью щупа размер воздушного зазора. Разница между отдельными зазорами, измеренными по окружности, не должна превышать 10% среднего значения зазора.

Центровка электрической машины с приводом и электрических машин между собой заметно влияет на износ оборудования, плохая центровка в ряде случаев приводит к пульсациям токов и моментов электродвигателей.

В связи с усложнением систем управления электроприводов, требующим специализации в области авторегулирования, персонал пуско-наладочных организаций и электролабораторий крупных заводов обычно уделяет мало внимания изучению конструкций электрических машин и не участвует в проверке их монтажа. По мнению автора, недостаточное внимание к данным вопросам является существенным пробелом в практике наладочных работ. Опыт развития электроприводов показывает, что решение многих технических проблем зарождалось в ходе наладочных работ и базировалось на согласовании конструкций, систем управления и вопросов монтажа.

Качество контроля механической части практически зависит от эрудиции наладчика, но все технические отчеты о наладке электроприводов должны содержать также сведения о выполненных монтажных работах. Каждый наладчик должен знать основную литературу по методике заводских испытаний, по ремонту и монтажу электрических машин [Л. 3, 5, 6, 10—12, 17].

Ниже приведен перечень основных монтажных работ и рассмотрены отдельные вопросы, подлежащие контролю:

1) телелаж машин;

- 2) подготовка приспособлений и специального инструмента;
- 3) установка фундаментных плит;
- 4) разборка и сборка машин, монтаж подшипников, шкивов и муфт;
- 5) контрольный осмотр и очистка всех деталей;
- 6) проверка изоляции обмоток и оценка необходимости сушки;
- 7) сушка машин;
- 8) проверка и корректировка воздушных зазоров;
- 9) центровка валов;
- 10) составление монтажного формуляра на электрическую машину и ее сочленение с агрегатом.

Следует изучить пользование штангенциркулями, малыми и большими (клиновыми) щупами, микрометрами, микрометрическими штихтмассами, динамометрами, выброметрами и другими приспособлениями и инструментами.

В ходе монтажа до установки якорей (роторов) следует проверить изоляцию у изолируемых подшипниковых стоек. Изолирующие листы стоек и прокладки крепящих болтов во избежание образования токопроводящих дорожек должны выступать на 5—10 мм от краев металлических деталей. Данные измерений изоляции отмечаются в протоколе.

Нагрев подшипников скольжения зависит от прилегания поверхности вала и нижних вкладышей, а также от зазоров под верхним вкладышем. Для обеспечения нормального «всплывания» вращающегося вала на масляной пленке считается необходимым, чтобы его шейка соприкасалась с баббитом по дуге в 60—90° и при этом не менее чем в двух точках на каждом квадратном сантиметре.

Подгонка вкладышей производится на заводе-изготовителе путем шабровки поверхности баббита. В процессе монтажа после центровки валов нередко приходится выполнять доводку поверхности вкладышей. Контроль соприкосновения поверхностей производят с помощью краски, наносимой на вал, а затем по следам сухого трения (при проворачивании вала выступающие места поверхности сухого баббита начинают блестеть).

Для нормального поступления масла под вращающийся вал между верхним вкладышем и шейкой вала должен быть очень маленький зазор. У подшипников с кольцевой смазкой этот зазор должен составлять 0,15—0,08% от диаметра вала; с увеличением диаметра относительная величина зазора уменьшается. В системах с принудительной смазкой зазор составляет 0,2—0,3%.

В некоторых конструкциях подшипников величина зазора мало влияет на качество смазки и его величина лимитируется только допустимым поднятием вала. При этом повышенные зазоры достаточно выправить напайкой отдельных пластинок—поясков баббита.

Контроль величины зазора производится путем оттисков кусочков свинца, имеющих первоначальную толщину 1—1,5 мм. Свинец мягче баббита и при пробном зажатии крышки подшипника не повреждает поверхность вкладыша.

В подшипниках качения нагрев зависит от качества их изготовления, от подбора и состояния смазки. Последнее время находят все большее применение прецизионные подшипники с очень малыми радиальными зазорами. Имели место случаи значительного нагрева указанных подшипников без видимой причины; исследования

показали, что нагрев вызывался слишком тугон посадкой наружного кольца подшипников.

Из монтажных работ следует ознакомиться с методикой насадки соединительных полумуфт.

Муфты подвергаются значительным статическим и ударным нагрузкам и поэтому должны устанавливаться на валы с необходимым натягом. Шпонки следует рассматривать только как дополнительные предохранительные устройства.

В практике пуско-наладочных работ нередко выявлялась слабая посадка полумуфт, но были также опасные случаи разрыва полумуфт при рабочих скоростях, достигавших всего 1 000—1 500 об/мин. Как правило, указанные повреждения вызывались неправильным соотношением диаметров вала и полумуфты.

Допустимое и рациональное натяжение определяется упругой деформацией металла. Диаметр отверстия в ступице полумуфты должен быть меньше диаметра вала на 0,09—0,11%, причем величину 0,11% [Л. 10] следует принимать для валов диаметром менее 260 мм. Величину «натяга» полумуфт можно оценить по нормируемым данным:

Диаметр вала, мм . . .	50	100	200	500
Натяг (необходимый от- рицательный допуск), мк	45—105	90—160	170—260	425—545

Небольшие полумуфты нередко набиваются на концы валов в холодном состоянии с помощью кувалды. Такая посадка влияет на подшипник, расшатывает крепление деталей якоря ротора, может вызвать нарушение сопрягаемой поверхности вала и поэтому нежелательна. Посадку муфты с натягом рекомендуется производить путем ее предварительного нагрева.

При перегреве стальных изделий на 100°С их линейные размеры увеличиваются на 0,125%, т. е. примерно на величину нормируемого натяга. Во избежание «закусывания», в особенности у крупных машин, муфты желательно подогреть примерно до 200—300°С.

Для стягивания шкивов и подшипников на торец вала необходимо устанавливать диск с центральной заточкой; недопустимо давить винтом непосредственно на торец вала, так как при этом нарушается (сминается) центр, необходимый для ревизии машины.

Для получения представления о центробежных силах, возникающих в деталях электрических машин, рассмотрим основные расчетные зависимости и некоторые примеры.

В общем случае тело массы M , расположенное на расстоянии r от оси вращения и имеющее угловую скорость ω , испытывает центробежную силу

$$P_{ц} = M\omega^2 r. \quad (1-4)$$

Формула (1-4) справедлива для деталей, масса которых сосредоточена в одной точке или распределена по кольцу незначительной толщины, вращающемуся относительно своей оси.

Вращающееся кольцо с радиусами r_1 и r_2 испытывает суммарные центробежные силы

$$\Sigma P_{ц} = \frac{2}{3} M\omega^2 r_{и}; \quad (1-5)$$

$$M = \frac{\gamma}{g} b\pi (r_2^2 - r_1^2). \quad (1-6)$$

где r_n — приведенный радиус инерции

$$r_n = \frac{r_2^2 + r_2 r_1 + r_1^2}{r_2 + r_1} = \frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2}; \quad (1-7)$$

γ — удельный вес материала;

b — ширина кольца.

Из (1-6) и (1-7) находим:

$$\Sigma P_{\text{ц}} = \frac{2}{3} \frac{\gamma}{g} b \pi (r_2^3 - r_1^3) \omega^2. \quad (1-8)$$

При сплошном диске

$$(r_1 = 0) r_n = \frac{2}{3} r_2 = \frac{2}{3} R.$$

Сила, разрывающая кольцо,

$$P_p = \frac{\Sigma P_{\text{ц}}}{2\pi}. \quad (1-9)$$

По величине разрывающей силы и площади F поперечного сечения может быть найдено среднее значение напряжения разрыва

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F} = \frac{\Sigma P_{\text{ц}}}{2\pi F}, \quad (1-10)$$

или

$$\sigma_p = \frac{\gamma}{3g} (r_2^2 + r_2 r_1 + r_1^2) \omega^2. \quad (1-11)$$

Пример 1. Обод стальной муфты имеет размеры: $b=12$ см, $r_2=16$ см, $r_1=14$ см. Требуется определить величину разрывающей силы и напряжение разрыва при скорости $n=3000$ об/мин.

Пользуясь зависимостями (1-8), (1-9) и (1-10), находим:

$$\Sigma P_{\text{ц}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{7,8 \cdot 10^{-3}}{981} 12\pi(16^3 - 14^3) \left(2\pi \frac{3000}{60}\right)^2 = 26,7 \cdot 10^3 \text{ кг};$$

$$P_p = 4,3 \cdot 10^3 \text{ кг}; \quad \sigma_p = 180 \text{ кг/см}^2.$$

Пример 2. Кулачок центробежного выключателя имеет вес $Q=600$ г. Расстояние от кулачка до оси вала двигателя $r=22$ см. Скорость вращения вала, при которой должен сработать центробежный выключатель, $n_{\text{макс}}=500$ об/мин. Требуется определить усилие пружины, удерживающей кулачок (с учетом угла приложения силы), отнесенное к центру тяжести кулачка.

В связи с малыми размерами кулачка по сравнению с расстоянием до оси вращения расчет можно вести по формуле (1-4).

Тогда

$$P_{\text{ц}} = M\omega^2 r = \frac{Q}{g} \left(2\pi \frac{n}{60}\right)^2 r;$$

$$P_{\text{ц}} = \frac{600 \cdot 10^{-3}}{981} \left(2\pi \frac{500}{60}\right)^2 r = 37 \text{ кг}.$$

Пример 3. Якорь микромашины имеет диаметр $D_{\text{я}}=30$ см, скорость $n=16\,000$ об/мин, вес меди в пазу $q_{\text{п}}=6$ г. Определить, с какой силой при вращении обмотка давит на клин (без учета трения).

$$P_{\text{к}} = \frac{Q}{g} \left(2\pi \frac{n}{60} \right)^2 r_{\text{к}}; \quad r_{\text{к}} = \frac{D_{\text{я}}}{2} - 0,3 = 1,2 \text{ см};$$

$$P_{\text{к}} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{981} \left(2\pi \frac{16\,000}{60} \right)^2 \cdot 1,2 = 20 \text{ кг}.$$

Пример 4. Якорь прокатного двигателя мощностью 5 700 квт имеет максимальную рабочую скорость 210 об/мин. Лобовые соединения якоря (с одной стороны якоря) весят 560 кг и имеют радиус инерции порядка 100 см. Определить сечение бандажной проволоки, если для нее допустимое напряжение $\sigma_{\text{б.д}}=25 \div 35$ кг/мм.

Сечение бандажной проволоки

$$S = \frac{P_{\text{р}}}{\sigma_{\text{б.д}}} K_3 = \frac{4,5 \cdot 10^3}{30} 5 = 750 \text{ мм},$$

где $K_3=5$ — коэффициент запаса.

Согласование положения осей электрических машин на практике монтажа принято называть центровкой валов. Центровка является ответственной и во многих случаях наиболее сложной монтажной операцией.

В зависимости от характера передаваемых усилий и от возможной точности центровки применяют полумуфты различных типов [Л. 15, 22, 44, 45]. Наиболее распространенными являются полужесткие втулочно-пальчиковые муфты; при сочленении с редукторами и с промежуточными валами все более широкое применение находят подвижные зубчатые муфты. При отсутствии отдельных подшипников в многомашинных агрегатах применяют жесткие муфты, образующие единую линию вала.

Многие приводы отличаются резким ударным изменением нагрузок. Иногда ударные нагрузки возникают из-за форсированных режимов в схемах управления. Если нет возможности снизить угловые ускорения, приходится применять муфты с резиновыми амортизационными дисками, с пружинами; небольшие двигатели успешно подсоединяются с помощью прорезиненных трубок.

В учебных пособиях и в справочниках можно встретить сильно разнящиеся данные о допустимых смещениях валов. Отмечается, что полужесткие муфты допускают параллельное смещение осей валов от 0,3 до 2 мм и угловой перекося до 1° . Вместе с тем рекомендуется выполнять центровку с точностью до 0,05—0,2 мм. Требуемая точность центровки, по мнению автора, не определяется типом муфты, а должна быть задана механиками и электриками применительно к определенным электроприводам. Ниже сделана попытка привести некоторые начальные рекомендации.

Параллельное смещение осей a (рис. 1-18) вызывает нежелательную деформацию упругих элементов в соединительных муфтах и знакопеременные радиальные усилия, передаваемые на подшипники. Поясняющая схема приведена на рис. 1-18,а.

Пусть ось ведущего вала O_1 смещена относительно оси ведомого вала O_2 на величину a и центр кулачка полумуфты расположен в точке A . Если не учитывать деформацию кулачка, то мгновенные значения угловых скоростей валов будут связаны зависимостью

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} \approx \frac{R + a}{R}.$$

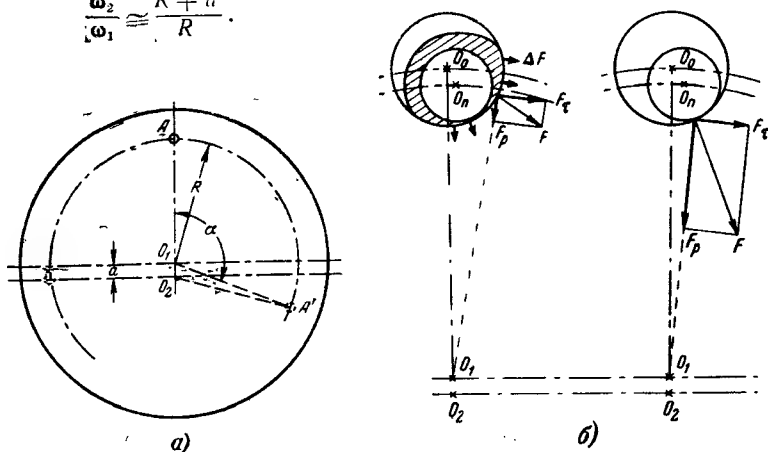


Рис. 1-18. Радиальные усилия и оборотные пульсации, возникающие при параллельном смещении валов.

Оборотные пульсации скорости ($\Delta\omega = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1}$), являющиеся существенным недостатком многих приводов, имеют гармонический характер [Л. 22]; их амплитуда $\Delta\omega$, %, зависит от размеров полумуфт и определяется простой зависимостью

$$\Delta\omega = \frac{a}{R} \sin \alpha; \Delta\omega = \frac{2a}{R} 100\%. \quad (1-12)$$

Здесь a — параллельное смещение осей; R — радиус, на котором расположены кулачки полумуфты; α — угол поворота вала (за один оборот α изменяется на 2π).

На рис. 1-18,б показана деформация прокладок (кожаных, резиновых, пластмассовых), сидящих на пальцах полумуфт. В момент времени, отмеченный на схеме, смещение оси пальца O_p относительно оси отверстия O_0 приводит к тому, что равнодействующая F усилий деформации направлена под острым углом к радиусу. Амплитуда радиальных усилий F_p , связанных со смещением полумуфт, в ряде конструкций превышает силы веса привода.

Таблица 1-1 дает представление о фактических оборотных пульсациях, имеющих место при реальных смещениях валов и разных размерах полумуфт.

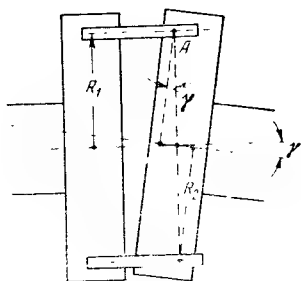
Из табл. 1-2 видно, что с точки зрения оборотных пульсаций скорости (а следовательно, и радиальных усилий) точность центровки должна быть обратно пропорциональна размеру полумуфт.

Таблица 1-1

**Оборотные пульсации скорости ведомого вала $\Delta n_{об}\%$,
при параллельном смещении осей a**

Радиус полу- муфты (до веду- щего паль- ца) R , мм	Смещение оси a , мм					
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0
12	1,3	2,6	5,2			
30	0,33	0,66	1,33	2	3,3	
50	0,2	0,4	0,8	1,2	2	4
100	0,1	0,2	0,4	0,6	1	2
200	0,05	0,1	0,2	0,3	0,5	1

Угловое смещение осей γ (рис. 1-19) вызывает значи-
тельно меньшие пульсации скорости [Л. 22]; эти пульсации имеют двой-
ную частоту, не зависят от разме-
ров соединительных муфт и в упро-
щенной форме их амплитуда выра-
жается зависимостью



$$\Delta \Omega \approx \pm (1 - \cos \gamma). \quad (1-13)$$

Таблица 1-2 дает представление
о фактических оборотных пульсациях,
вызываемых угловым смещением
осей γ .

Из таблицы видно, что угловое
смещение валов на 2° и даже на 4°
не вызывает больших оборотных
пульсаций скорости. Поэтому указан-
ное в справочниках (для полужестких муфт) допустимое угловое
смещение на 1° является слишком жестким.

Таблица 1-2

**Оборотные пульсации скорости ведомого вала $\Delta n_{об}\%$,
при угловом смещении осей на угол γ**

	γ			
	$30'$	1°	2°	4°
$\cos \gamma$	0,9999	0,9998	0,9994	0,9976
$\Delta n_{об}, \%$	$\pm 0,01$	$\pm 0,02$	$\pm 0,06$	$\pm 0,24$

Электрические машины, соединяемые в агрегаты,
имеющие продолжительный режим работы, могут и
должны быть отцентрованы с максимально возмож-

ной точностью. На основании справочных данных [Л.10], с учетом опыта монтажа и эксплуатации составлены нормативы (табл. 1-3) допустимого параллельного смещения осей электрических машин, соединяемых в агрегаты.

Таблица 1-3

Допустимое параллельное смещение осей, мм

n, об/мин	Диаметр вала, мм				
	5	20	50	200	500
До 500	0,08	0,1	0,15	0,08	0,06
1 000	0,06	0,08	0,1	0,06	0,04
3 000	0,03	0,06	0,06	0,04	0,02

Сравнение табл. 1-1 и 1-3 показывает, что, несмотря на увеличение диаметров валов (а следовательно и соединительных муфт), крупные машины всех рабочих скоростей требуется центровать с большой точностью.

Для двигателей, работающих в повторно-кратковременных режимах с большим количеством включений, устанавливаемых в трудно доступных местах и периодически снимаемых из-за плановых или аварийных ремонтов, нецелесообразно устанавливать жесткие нормативы на центровку, ибо они не будут выполняться. Учитывая вышеуказанное, в табл. 1-4 приведены рекомендуемые нормативы на центровку двигателей клапанов, задвижек, монтажных лебедок, цеховых транспортных кранов и других подобных механизмов.

Таблица 1-4

Допустимое параллельное смещение осей, мм

n, об/мин	Диаметр вала, мм					
	5	10	20	50	100	150
До 200	0,2	0,3	0,5	0,6	0,8	1,0
500	0,2	0,25	0,4	0,5	0,6	0,6
1 000	0,15	0,2	0,3	0,3	0,35	0,4
1 500	0,1	0,1	0,2	0,25	0,25	0,25

Показателем хорошего монтажа служит установка двигателей с уменьшением приведенных величин в 1,5—2 раза. С другой стороны, когда в эксплуатации наблюдается бой валов, превышающий рекомендуемые нормы, они должны быть срочно отцентрованы.

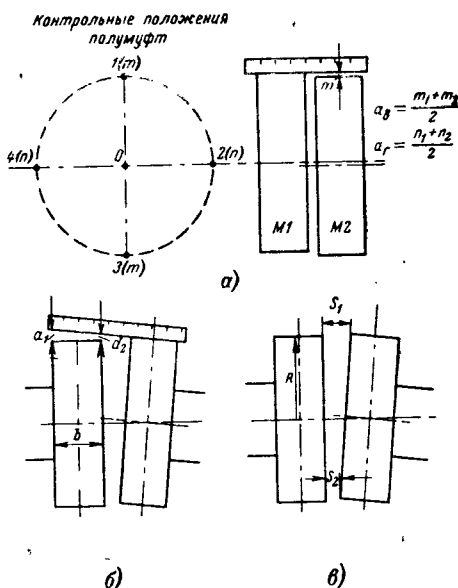


Рис. 1-20. Центровка валов с помощью линейек.

a — проверка параллельного смещения валов;
б — проверка перекоса валов; *в* — проверка угло-
 вого перекоса по зазору между полушмфтами.

Типы соединительных муфт должны подбираться с учетом реально достигаемой точности центровки. Естественно, во многих случаях точность центровки, указанная в табл. 1-4, окажется недостаточной. Повышенные требования предъявляются безредукторными механизмами и устройствами с большими маховыми массами.

Грубая центровка валов проверяется с помощью линейек, прикладываемых к образующим полушмфт [Л. 9]. При этом сопрягаемые валы должны совместно проворачиваться в положения 1, 2, 3, 4 (рис. 1-20, а). Смещения осей по вертикали a_v и по горизонтали a_r равны среднеарифметическим из замеров

$$a_v = \frac{m_1 + m_2}{2} ; \quad a_r = \frac{n_1 + n_2}{2}.$$

Угловой переко с также лучше проверить линейкой по образующим полумуфт (рис. 1-20,б)

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{a_1 - a_2}{b}. \quad (1-14)$$

В литературе рекомендуют проверять угловое смещение по зазору между полумуфтами (рис. 1-20,в)

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{s_1 - s_2}{2R}. \quad (1-15)$$

Однако этот метод может привести к грубым ошибкам, так как при поворачивании валы нередко смещаются в осевом направлении.

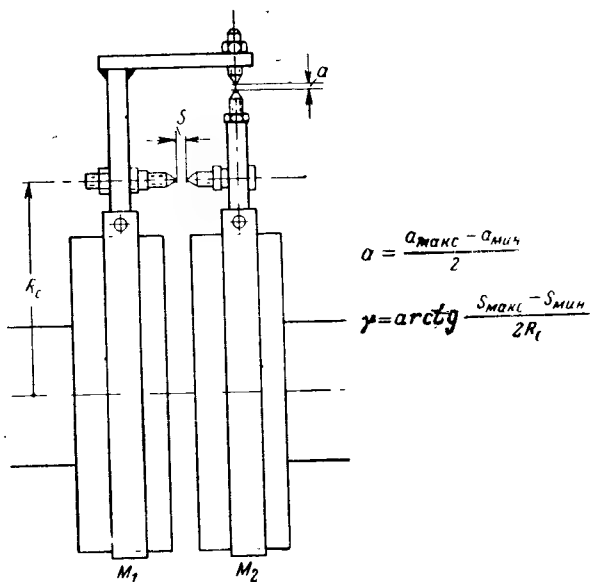


Рис. 1-21. Центровка валов с помощью скоб и щупов.

Для точной центровки на полумуфтах укрепляются различного рода скобы. Зазоры между скобами (рис. 1-21) измеряются с помощью щупов или микрометрических индикаторов.

Радиальное смещение

$$a = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2}.$$

Угол перекося осей

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{s_{\max} - s_{\min}}{2R_c}. \quad (1-16)$$

В промышленности широко распространено соединение двигателей с механизмами при помощи промежуточных валов. Для центровки таких двигателей рекомендуется применять линейки или точно выполненные угольники и струны. Поясняющие схемы даны на рис. 1-22.

Угольники $У_1$ и $У_2$ укрепляются на центруемых полумуфтах $М_1$, $М_2$ таким образом, что их образующие параллельны осям и удалены от них на одинаковые расстояния R . Между полумуфтами по образующим угольников натягивается струна $С$. При разных положениях полумуфт $М_1$, $М_2$ замеряются зазоры a_1 , a_2 , b_1 , b_2 между струной и угольниками и по ним корректируется центровка валов.

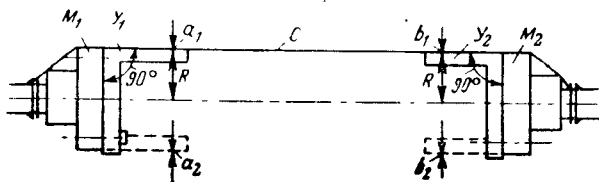


Рис. 1-22. Центровка двигателей, соединяемых с помощью промежуточных валов.

В данном параграфе рассмотрены только некоторые особенности монтажа электрических машин, важные для обеспечения надежности их работы, но недостаточно или не совсем точно (по мнению автора) освещенные в литературе. Для получения необходимых знаний в области монтажа рекомендуется изучить литературные пособия [Л. 9, 10, 11 и 12].

1-6. Измерение сопротивления и контроль изоляции обмоток

Величина сопротивления изоляции обмоток машин является одним из основных показателей, определяющих допустимость их включения на рабочее напряжение. Изоляция обмоток измеряется перед пробным пуском машины, а затем периодически в ходе нормальной эксплуатации; кроме того, изоляция должна контролироваться после длительных остановок и при каждом аварийном отключении привода.

Во время первоначальной наладки машин постоянно-го тока желательно в отдельности проверить изоляцию якоря, дополнительных полюсов и обмоток возбуждения; у машин переменного тока измеряется изоляция обмоток каждой фазы по отношению к заземленному корпусу и соединенным с ним обмоткам других фаз. В последующем изоляция может проверяться без отключения обмоток друг от друга совместно с подводящими

проводами; обмотки отключаются от схемы только при необходимости отыскания мест с пониженной изоляцией.

Для измерения изоляции применяются мегомметры различных напряжений [Л. 26] на 250, 500, 1 000 и 2 500 в. Процесс измерения состоит в следующем.

Зажим экрана мегомметра присоединяется к корпусу машины; от второго зажима гибкий провод с надежной изоляцией (типа «магнето») подводится к выводу обмотки, коллектору или иному испытываемому элементу машины. Желательно на свободных концах проводов от мегомметра иметь ручки из изоляционного материала со встроенными медными штырями или зажимами. Ручку мегомметра следует вращать со скоростью примерно 120 *об/мин*. При испытании небольших машин, имеющих незначительную емкость, стрелка прибора быстро устанавливается в положение, соответствующее сопротивлению изоляции, и отсчет можно производить уже через несколько секунд с начала вращения индуктора. При измерении изоляции крупных машин показания мегомметра постепенно увеличиваются и их принято отмечать через 15 и 60 *сек* (см. ниже) с начала вращения рукоятки. После окончания испытаний сохранившийся на обмотке потенциал высокого напряжения следует снять путем ее заземления на 1—2 *мин*. Заземляющий проводник сначала надежно присоединяется к корпусу машины, а затем другим концом подводится к выводу обмотки.

При пользовании мегомметром необходимо соблюдать установленные правила техники безопасности [Л. 19, 26]; особую осторожность следует проявлять при испытании изоляции обмоток без отсоединения подводящих проводов, ибо в этом случае возможно возникновение напряжения на удаленных участках, где работают люди.

Измерение изоляции обмоток мегомметром считается одним из основных контрольных испытаний. Однако для наиболее распространенных машин переменного тока напряжением до 380 в и постоянного тока напряжением 220 в в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ) и в Правилах технической эксплуатации (ПТЭ) отсутствуют четкие нормы, по которым можно было бы судить о том, что полученная величина сопротивления изоляции является допустимой. В ГОСТ 183-66 указано, что сопротивление изоляции машин всех типов долж-

но быть не менее 1 *Мом* на 1 кв номинального напряжения машины.

Во время наладки нормы контроля изоляции должны согласовываться с последними инструкциями и действующими правилами [Л. 9, 19, 25, 26]. При испытании больших (более 150 квт) и высоковольтных машин желательно получить рекомендации от заводов-изготовителей.

Таблица 1-5

Допустимые сопротивления изоляции R_{60} высоковольтных машин переменного тока, *Мом*

$U, \text{ кв}$	$t, ^\circ\text{C}$					
	10	20	40	60	80	100
3	96	48	24	12	6	3
6	190	96	48	24	12	6
10	320	160	80	40	20	10

Величину сопротивления изоляции желательно измерять при нагретых машинах; следует иметь в виду, что замеры, выполненные при температуре ниже 10°C , совершенно не показательны

Таблица 1-6

Допустимые сопротивления изоляции R_{60} машин постоянного тока, *Мом*

$U_{\text{п}}, \text{ в}$	$t, ^\circ\text{C}$					
	10	20	40	60	70	75
220	2,7	1,85	0,85	0,4	0,3	0,22
460	5,3	3,7	1,75	0,8	0,5	0,45
750	9,3	6,3	2,9	1,35	0,9	0,75
900	10,8	7,5	3,5	1,6	1	0,9

Сопротивление изоляции машины резко снижается по мере ее нагревания; степень снижения зависит от сорта изоляционных материалов, сорта применяемого при пропитке обмоток компаунда и конструктивных особенностей. В некоторых справочниках для сравнения с нормами полученные значения сопротивления изоля-

ции рекомендуется делить на два на каждые 20°C , недостающие до максимальной рабочей температуры.

Наименьшие допустимые (нормируемые) величины сопротивлений изоляции (R_{60}) высоковольтных машин переменного тока приведены в табл. 1-5, машин постоянного тока — в табл. 1-6.

Во время наладочных работ были собраны опытные данные, по которым сопротивление изоляции зависит от температуры в еще большей степени, чем указано в табл. 1-5 и 1-6.

Разность температур машины в холодном и рабочем состояниях, $^{\circ}\text{C}$

20

40

60

80

100

Отношение сопротивления изоляции машины в холодном состоянии к сопротивлению изоляции при рабочей температуре

3

10

30

100

300

В ответственных случаях следует произвести в порядке контроля нагревание машины до рабочей температуры и измерить сопротивление изоляции [Л. 9, 14, 27].

По опыту наладки нового, вводимого в эксплуатацию оборудования сопротивление изоляции машин, измеренное при температуре около 20°C , как правило, значительно превышает 1 *Мом* и лежит в пределах от 5 до 100 *Мом*.

Падение сопротивления изоляции обмоток ниже указанных значений вызывается разными причинами: проникновением в толщу изоляции влаги, поверхностной влажностью или оседанием токопроводящей пыли на выводах, обмотках и коллекторе машины.

В этих случаях рекомендуется произвести следующее:

а) продуть машину и почистить салфетками выводы обмоток, торец коллектора, изоляционные детали щеткодержателей; произвести повторное измерение изоляции;

б) если окажется, что очистка деталей не помогла, произвести поверхностную сушку обмоток и их выводов с помощью воздуходувки, а затем провести контрольное измерение изоляции.

У машин, находившихся в длительной эксплуатации, причиной низкой величины сопротивления изоляции может явиться попадание токопроводящей пыли вместе

с маслом в обмотку или изоляционные детали, что не удается выправить продувкой и протиркой.

Для того чтобы отличить такое повреждение изоляции от общей увлажненности обмотки, следует произвести измерение сопротивления изоляции мостиком Уитстона при двух направлениях тока в контролируемой цепи. Если низкое сопротивление изоляции вызывается токопроводящей пылью, то мостик при обоих измерениях покажет одинаковые результаты. При неодинаковых показаниях наиболее вероятной причиной можно считать проникновение в обмотку влаги и образование гальванической э. д. с., которая и создает разные показания при измерении мостиком. Для повышения сопротивления изоляции необходимо удалить попавшую в машину вместе с маслом пыль путем промывки изоляции ксилолом, толуолом или иным сильным растворителем. Данная операция должна выполняться квалифицированным персоналом и, как правило, требует полной разборки машины [Л. 11, 14].

Как правило, электрические машины мощностью до 100 кВт и напряжением до 380 в включаются без сушки, даже в тех случаях, когда их сопротивление изоляции менее 1 Мом. Из практики наладки и эксплуатации известно, что асинхронные двигатели вспомогательных приводов, включающиеся иногда при изоляции 100 ком и ниже, в ходе работы постепенно подсушивались и затем служили много лет безотказно. Однако включение при пониженной величине сопротивления изоляции машин, не прошедших испытания повышенным напряжением, допустимо только в тех случаях, когда имеются запасные машины и стоимость подвергаемой риску машины несравненно ниже технико-экономических потерь из-за простоев оборудования.

Показания мегомметра зависят от длительности приложения напряжения к обмоткам. В упрощенной форме это явление можно объяснить следующим образом: при неувлажненной изоляции во время подачи напряжения емкость машины постепенно заряжается, ток зарядки (ток утечки) снижается и мегомметр показывает увеличение сопротивления изоляции (рис. 1-23,а). В случае увлажненной изоляции и при наличии каких-либо токопроводящих дорожек (например, по слою пыли или по каналу пробоя) показания мегомметра быстро устанавливаются и перестают возрастать.

Отношение показаний мегомметра после 60-секундного приложения напряжения к показаниям 15-секундного замера называется *коэффициентом абсорбции* $K_a = R_{60}/R_{15}$. Эта величина позволяет более полно оценить фактическое состояние изоляции и нормируется в пределах $K_a \geq 1,1 \div 1,3$. Вместе с тем следует учесть, что величина K_a даже при хорошем состоянии изоляции

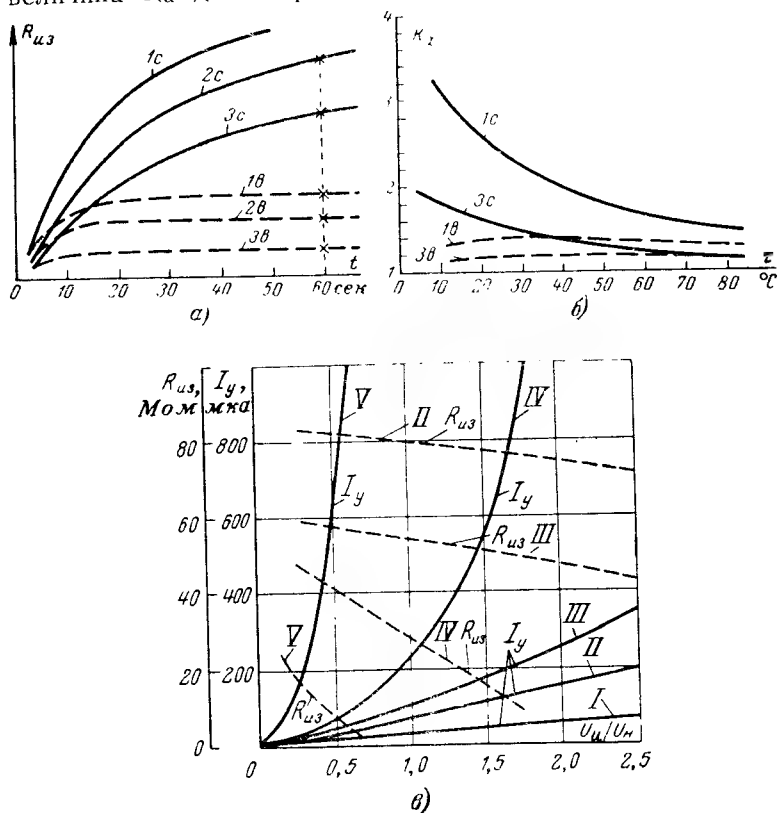


Рис. 1-23. Показания мегомметра и данные испытаний изоляции повышенным напряжением.

а — зависимость сопротивления изоляции $R_{из}$ от времени t приложения напряжения мегомметра; **б** — зависимость коэффициента абсорбции K_a от температуры испытуемой машины; **в** — примерные кривые зависимости токов утечки I_y и сопротивления изоляции $R_{из}$ электрических машин от приложенного выпрямленного напряжения $U_н/U_{нн}$; Ic — характеристики высоковольтных крупных машин при сухой (неувлажненной) изоляции; $I\theta$ — то же, что Ic , но при влажной изоляции; $2c$, 2θ — характеристики крупных машин напряжением до 800 в; $3c$, 3θ — характеристики машин средней и малой мощности напряжением 380 в (при переменном токе) и 220 в (при постоянном токе).

в значительной степени зависит от температуры машин и вида примененных изоляционных материалов. Пользуясь материалами некоторых справочников и обобщая опыт многочисленных замеров, зависимость $K_a = f(\tau^\circ \text{C})$ можно характеризовать кривыми, приведенными на рис. 1-23,б.

В том случае, когда при проверке машины высокого напряжения мегомметр показывает пониженное сопротивление изоляции (менее 1 Мом на 1 кв) и коэффициент абсорбции ниже 1,2, перед наладчиком возникает ответственная задача: допустимо ли подвергнуть машину испытанию повышенным напряжением, можно ли разрешить ее включение на рабочее напряжение или сначала необходимо произвести тщательную сушку обмоток.

В подобных затруднительных случаях оценку состояния изоляции можно провести по характеру роста тока утечки при постепенном увеличении испытательного выпрямленного напряжения. Для этой цели можно использовать кенотронный аппарат, присоединяя его попеременно к каждой испытываемой обмотке и определяя токи утечки при подъеме испытательного напряжения по ступеням (0,5—1—1,5—2—2,5) U_n . На каждой ступени напряжения необходимо делать выдержку в течение 1 мин и, записав величину тока утечки (в конце выдержки), отключить обмотку от трансформатора. Затем следует произвести разрядку испытываемой обмотки на корпус, сделать выдержку около 2 мин и испытуемое напряжение повысить вновь, но уже до более высокой ступени.

В процессе испытания следует составить график зависимости токов утечки и сопротивления изоляции от испытательного напряжения. Последнее определяется из отношения $R_{из} = U_n / I_y$ в/мка. Если на какой-либо ступени сопротивление изоляции снизится по сравнению с результатом предыдущего измерения более чем на 30%, дальнейшее повышение напряжения следует производить более плавно (например, по 0,25 U_n). В тех случаях, когда при дальнейшем испытании величина сопротивления изоляции снизится в 3—4 раза по сравнению с величиной, полученной при 0,5 U_n , изоляцию надо считать недопустимо влажной. Такая машина должна быть подвергнута сушке. На рис. 1-23,в в качестве примера представлены экспериментальные кривые токов утечки I_y и характеристики сопротивления изоляции $R_{из}$, получен-

ные при испытании пяти крупных электрических машин. Машины с соответствующими кривыми I, II и III можно считать выдержавшими испытание; машины с кривыми IV и V нуждаются в сушке.

Сушка машин производится различными методами, описанными в пособиях по монтажу [Л. 11, 13 и др.]. Наиболее часто монтажные организации сушат машины методом наружного обогрева с помощью воздуходувок или грелок. При этом ближайшие к источнику тепла части машины не должны нагреваться более 80—100°С. Однако такой способ сушки мало экономичен и не всегда дает результаты, так как машина нагревается неравномерно и в отдельных частях обмотки влага остается «закупоренной».

Широко применяется индуктивный метод сушки, не связанный с прохождением токов в обмотках; под действием вихревых токов тепло выделяется в корпусе, на валу и в остальных массивных частях машины. Во время нагревания машины сопротивление изоляции сначала снижается, а затем по мере удаления влаги постепенно повышается и, наконец, устанавливается примерно постоянным.

При прогревании до температуры 75—85°С небольшие машины высушиваются обычно за 15—20 ч, средние — за двое суток, а крупные — за пять-шесть суток. Однако наблюдались случаи, когда сушка крупных машин высокого напряжения в течение 10—12 суток при 80°С не давала результатов. Причиной этого являлась закупорка влаги между слоями пропитанной изоляции и токоведущими частями обмоток. Опыт показал, что последующий подъем температуры при прогревании до 95—100°С позволил удалить оставшуюся влагу за 10—15 ч.

У машин мощностью до 100 кВт сушку, как правило, можно прекращать, когда сопротивление изоляции обмоток, нагретых до 60—70°С, достигает 0,2—0,5 Мом и держится примерно неизменным 1—2 ч.

1-7. Проверка изоляции подшипников

В крупных машинах постоянного тока наблюдается значительное продольное намагничивание вала. К этому явлению приводят различные факторы — потоки рассеивания, геометрическая несимметрия, несимметрия ком-
4—2566

пенсационных обмоток. Аналогично происходит намагничивание валов синхронных машин. При вращении в валу машины наводится э. д. с., которая может привести к протеканию токов через подшипники и фундаментную плиту. У асинхронных машин на концах вала обычно создается гармоническая э. д. с.; ее амплитуда и частота с увеличением скорости в ряде случаев снижаются.

Для защиты шеек вала и вкладышей от паразитных токов стояковые подшипники крупных электрических машин или агрегатов, собранных из нескольких машин, изолируются (по усмотрению завода-изготовителя) от фундаментной плиты текстолитовыми или изолятовыми подкладками. По требованию ПУЭ необходимо производить проверку состояния изоляции у изолированных подшипников электрических машин. Это испытание следует выполнять в процессе монтажа при собранных маслопроводах. Для испытаний применяется мегомметр напряжением 1000 в. Величина сопротивления изоляции не нормируется, но практически должна быть не ниже 0,5 Мом для новых машин и 0,1 Мом для машин, бывших в эксплуатации.

Проверка изоляции подшипниковых стояков должна производиться до укладки ротора, так как все подшипники связываются валом между собой, а через неизолированный подшипник — также со станиной. Обычно по технологии монтажа собирается машина и устанавливается ротор, а затем монтируется маслопровод; это не позволяет выполнить требование ПУЭ. В этих случаях следует проверить качество изоляции деталей отдельно — сначала изоляцию подшипниковых стояков, а затем изоляцию маслопроводов после их сборки.

Помимо этого, требуется по нормам ПУЭ проверить изоляцию подшипников указанных машин в процессе работы. Измерение можно производить с помощью вольтметра переменного тока на напряжение 3 в, имеющего малое внутреннее сопротивление, или амперметра с добавочным сопротивлением. Методика измерений следующая. Производится замыкание накоротко масляных пленок у подшипников с обоих концов машины путем установки перемычек между каждым подшипниковым стояком и валом (рис. 1-24). Связь перемычки с валом осуществляется при помощи скользящего контакта. Соединение вала с подшипниковым стояком необходимо

по той причине, что при вращении машины вал «всплывает» на масляной пленке, из-за чего может создаваться большое переходное сопротивление и исказятся результаты измерений.

После указанной подготовки производится два измерения напряжения: первое — между изолированным подшипниковым стояком и фундаментной плитой; второе — между концами вала машины у подшипников. При хорошей изоляции стоек подшипников результаты обоих

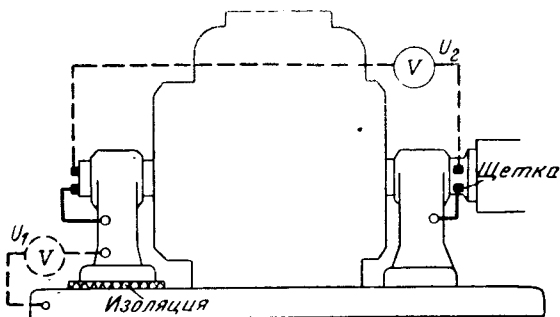


Рис. 1-24. Схема проверки изоляции подшипников.

измерений должны быть равны между собой. Если напряжение U_1 при первом измерении значительно меньше, чем U_2 при втором, то это говорит о повреждении изоляции подшипника.

Последние годы крупные двигатели постоянного тока часто комплектуются с подвесными тахогенераторами, ротор которых жестко закрепляется на торце вала двигателя, а корпус опирается на подшипники и только удерживается от поворачивания. В таких приводах, кроме изоляции стоякового подшипника двигателя, необходимо изолировать от плиты скобу, удерживающую корпус тахогенератора.

1-8. Измерение сопротивлений обмоток при постоянном токе

Измерения сопротивлений обмоток производится с целью проверки исправности схемы соединений, надежности паяк и уточнения технических данных, используемых при расчетах и настройке режимов управ-

ления. У крупных машин постоянного тока и машин переменного тока высокого напряжения следует произвести измерения сопротивлений всех обмоток; измерение сопротивлений обмоток машин переменного тока низкого напряжения, а также якорей и последовательных компенсационных обмоток машин постоянного тока мощностью ниже 40 кВт рекомендуется производить только при необходимости проверить их исправность или определить схему внутренних соединений.

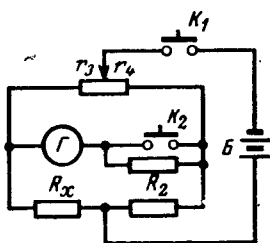


Рис. 1-25. Схема измерения сопротивлений при помощи одинарного моста.

Измерения активных сопротивлений выполняются с помощью моста постоянного тока или методом вольтметра — амперметра.

Для измерения сопротивлений больше 1 ом целесообразно пользоваться одинарными мостами Уитстона (см. § 1-4). Принцип их действия, как известно, основан на подборе отношения сопротивлений (рис. 1-25), при котором гальванометр не дает отклонений.

$$\text{Искомое сопротивление } R_x = R_2 \frac{r_3}{r_4}.$$

Обычно сопротивление обмотки достаточно измерить с точностью до 1—2%. Для измерения сопротивлений менее 1 ом применяются двойные мосты (см. § 1-4), питаемые от аккумуляторной батареи или от выпрямителя.

При отсутствии специальных устройств измерение сопротивлений обмоток может быть произведено методом вольтметра — амперметра или одного вольтметра. Сопротивление R_x последовательно с амперметром A (иногда через добавочное сопротивление) включается на напряжение постоянного тока; вольтметр подключается по схеме рис. 1-26,а или 1-26,б. Искомое сопротивление R_x приближенно определяется из отношения $R_x = U/I$.

Обе схемы измерения создают некоторые погрешности, зависящие от потребления приборов: в первом случае (рис. 1-26,а) действительное значение сопротивления будет $R_x = \frac{U - IR_a}{I}$, во втором

$$\text{(рис. 1-26,б)} R_x = \frac{U}{\frac{U}{R_a} - I}, \text{ где } R_a \text{ и } R_b \text{ — внутренние сопротив-$$

ления амперметра и вольтметра. Практически при измерении параллельных обмоток сопротивлением более 50 ом приборами магнито-

электрической системы следует пользоваться первой схемой (рис. 1-26,а), сопротивления менее 50 ом более точно можно измерить по второй схеме (рис. 1-26,б).

Измерение с помощью одного вольтметра дает достаточно точные показания, когда сопротивление обмотки имеет величину такого же порядка, как и внутреннее сопротивление прибора. При этом производятся два измерения: сначала вольтметр присоединяется к батарее (рис. 1-26,в) и определяется ее напряжение U_6 , затем последовательно с вольтметром включается сопротивление R_x (рис. 1-26,г) и замечается новое отклонение прибора U_1 . Искомое R_x определяется из соотношения

$$R_x = R_v \left(\frac{U_6}{U_1} - 1 \right).$$

Измерения следует производить при небольших токах по сравнению с номинальными во избежание чрезмерного нагревания обмотки и искажения результатов измерения.

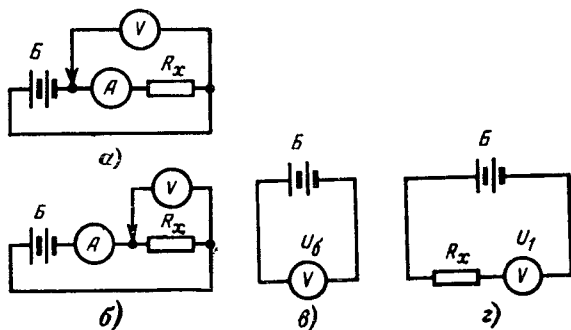


Рис. 1-26. Схемы измерения сопротивлений с помощью вольтметра и амперметра.

а — измерение сопротивлений свыше 50 ом методом вольтметра-амперметра; б — то же до 50 ом; в — измерение сопротивлений с помощью вольтметра (первое измерение); г — то же, но второе измерение.

В общем случае для пересчета результатов измерений сопротивления r_1 , выполняемых при температуре τ_1 , на температуру τ_2 можно пользоваться следующей формулой:

$$r_2 = r_1 [1 + \alpha (\tau_2 - \tau_1)]; \quad r_2 = r_1 \frac{k + \tau_2}{k + \tau_1}, \quad (1-17)$$

Здесь $\alpha = \frac{1}{k + \tau_1}$ — температурный коэффициент; для меди $k_m = 235$, для алюминия $k_a = 245$.

При производстве измерений методом вольтметра — амперметра необходимо учитывать, что обмотки электрических машин обладают значительной индуктивно-

стью и при отключении источника питания на них могут возникнуть напряжения, опасные для персонала, а также для витковой изоляции самих обмоток. Во избежание повреждений вольтметр следует подсоединять к схеме только после включения источника питания и отсоединять до разрыва цепи тока в обмотке.

1-9. Испытание электрической прочности изоляции обмоток повышенным напряжением

Испытание машин на заводах-изготовителях, а также после перемотки в электроремонтных цехах производится по нормам ГОСТ 183-66, предписывающим приложение повышенного напряжения переменного тока промышленной частоты синусоидальной формы и строго определенной величины. На месте монтажа испытание повышенным напряжением машин, входящих в схему электропривода, по нормам ПУЭ производить не обязательно, и оно выполняется только по усмотрению заказчика [Л. 19, 25].

Изоляция обмоток машин имеет большой запас прочности, и для нее испытание повышенным напряжением является безвредным. С другой стороны, пробой изоляции новых машин при включении на рабочее напряжение бывает очень редко, поэтому организация испытаний высоким напряжением может быть оправдана только в случае длительного хранения в сыром помещении или при сборке машины на месте монтажа.

Испытание повышенным напряжением производится после окончания всех монтажных и наладочных работ, предшествующих пробному пуску. К началу испытаний необходимо убедиться, что показатели увлажненности обмоток машины удовлетворяют нормам. Как было указано выше, для этого служат показания мегомметра, коэффициент абсорбции, а в затруднительных случаях — кривая токов утечки.

Нормированные величины испытательных напряжений для новых и перемотанных машин различных видов приведены в разд. I ПУЭ [Л. 18].

Машины, бывшие в эксплуатации и прошедшие ремонт с разборкой, но без смены обмоток, следует испытать повышенным напряжением для выявления возможных механических повреждений изоляции. При этом величина испытательного напряжения берется в соот-

ветствии с требованиями Правил технической эксплуатации ниже норм, установленных для новых обмоток:

Номинальное напряжение электродвигателя, <i>кв</i>	До 0,3	0,5	2	3	6	10
Испытательное напряжение переменного тока, <i>кв</i>	1	1,5	4	5	10	16

Продолжительность испытания 1 мин.

Во многих ведомственных материалах указывается, что двигатели напряжением 380 в допускается испытывать мегомметром на 1 000 в. Однако фактически это уже не будет испытанием прочности изоляции, так как мегомметр резко снижает свое напряжение от действия токов утечки. Например, мегомметр на 1 000 в при сопротивлении изоляции 1 Мом дает на выходе только 550 в, что не выше амплитудного значения рабочего напряжения двигателя.

Таким образом, машины напряжением 380 в, прошедшие ремонт, целесообразно испытывать мегомметром на 2 500 в или с помощью трансформатора, дающего эффективное напряжение 1 500 в.

При выборе испытательного трансформатора надо учитывать емкость обмотки испытуемой машины.

Требуемая номинальная мощность трансформатора P_n может быть определена по формуле

$$P_n = P_{\text{и}} \frac{U_n}{U_{\text{и}}},$$

где

$$P_{\text{и}} = \omega C U_{\text{и}}^2 \cdot 10^{-9}, \text{ ква.} \quad (1-18)$$

Здесь $P_{\text{и}}$ — нагрузка испытательного трансформатора, *ква*;

$\omega = 2\pi f = 314$ (f — частота сети, равная 50 гц);

C — емкость обмотки, *нф*;

$U_{\text{и}}$ — испытательное напряжение, *кв*;

U_n — номинальное напряжение трансформатора, *кв*.

Емкость обмотки легко измерить на пониженном напряжении методом вольтметра; методика измерений описана в гл. 5.

Для испытания электрических машин мощностью до 1 000 *квт* удобно применять аппарат типа АИИ-70, имеющий трансформатор мощностью 2 *ква* и максимальное

эффективное напряжение 50 кВ; можно использовать также трансформатор от маслопробойника типа АМИ-50 или два трансформатора напряжения типа НОМ-10, включая их обмотки высокого напряжения последовательно. Крупные машины имеют значительную емкость, и для их испытания указанные выше аппараты могут оказаться непригодными из-за недостаточной мощности.

Пример 5. Крупный синхронный электродвигатель напряжением 6 кВ имеет емкость $C=1 \cdot 10^5$ пф; нормируемое испытательное напряжение $U_{\text{н}}=10$ кВ.

Потребляемая мощность при испытании составит:

$$P_{\text{н}}=314 \cdot 10^5 \cdot 10^2 \cdot 10^{-9} \approx 3 \text{ ква.}$$

Если $U_{\text{н}}=10$ кВ, то

$$P_{\text{н}} = P_{\text{и}} \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{и}}} = 3 \frac{6}{10} \approx 1,8 \text{ ква.}$$

Для проведения испытаний собирается схема, приведенная на рис. 1-27. В ответственных случаях контроль напряжения должен осуществляться со стороны

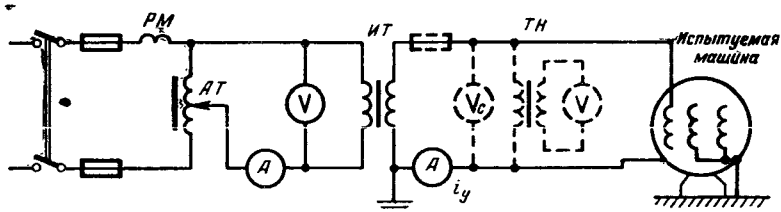


Рис. 1-27. Схемы испытания изоляции машины повышенным напряжением.

высокого напряжения, так как под действием емкостной нагрузки может значительно исказиться коэффициент трансформации испытательного трансформатора. Для измерений может быть использован трансформатор напряжения $TН$ или статический вольтметр V_c (например, типа С-96 со шкалой до 30 кВ). При испытании крупных машин для защиты обмоток от случайного недопустимого повышения испытательного напряжения желательно применить шаровой разрядник ШР, настраиваемый на напряжение, превышающее испытательное на 5—10%. В схему вводится максимальная защита $РМ$, настраиваемая примерно на двойной ток холостого хода трансформатора при испытательном напряжении,

С целью предотвращения большого тока можно применить дополнительное сопротивление R_d . Регулировку напряжения испытательных трансформаторов ИТ небольшой мощности удобно производить с помощью ползункового автотрансформатора АТ; при больших мощностях можно пользоваться индукционным машинным регулятором напряжения.

Испытание должно проводиться квалифицированным наладочным персоналом при строгом соблюдении Правил техники безопасности в присутствии представителей монтажной организации и завода-заказчика, а в ответственных случаях желательно также присутствие представителя завода — изготовителя машины. Перед испытанием необходимо проверить сопротивление изоляции мегомметром. Подъем напряжения производится плавно или ступенями, не превышающими 5% полного значения; время повышения испытательного напряжения от половинного до полного его значения должно быть не менее 10 сек. Продолжительность испытания полным напряжением 1 мин. Снижение напряжения также следует производить постепенно до значения не более 1/3 испытательного, после чего можно отключить установку. По окончании испытания необходимо обмотку разрядить, соединив ее с корпусом машины, и вновь проверить сопротивление изоляции мегомметром.

Машину можно считать выдержавшей испытание, если в течение минуты не произойдет пробоя или частичного нарушения изоляции, что может быть выявлено показаниями приборов, а также внешними признаками: по выделению дыма, специфического запаха и звука, напоминающего шелест, или визуальным наблюдением искры на поверхности изоляции. В случае полного пробоя изоляции испытательную установку отключает автомат. Вероятность пробоя изоляции может быть обнаружена по непрерывному возрастанию тока утечки во время поддержания испытательного напряжения (1 мин). В этом случае испытание следует приостановить и внимательно обследовать обмотку машины.

1-10. Пуск двигателя

Пуск электродвигателя знаменует собой готовность основных строительно-монтажных работ, и поэтому отмечается как своего рода торжественное событие. К пу-

ску должны быть окончены работы по фундаментам и металлоконструкциям, по электроснабжению и монтажу электроаппаратуры; должны быть убраны строительные отходы и обеспечены условия техники безопасности.

Первый пробный пуск смонтированного электродвигателя производится после окончания наладочных работ по настройке схемы управления и после испытания неподвижной машины. Разрешение на пуск двигателя должно быть получено от организаций, выполнивших его ревизию, установку и сушку. Для установления полной исправности и надежности двигателя желательно предварительно испытать его в режиме холостого хода при отсоединенных механизме и редукторе. Однако механики обычно сразу после центровки присоединяют двигатели к редукторам, и наладчики во избежание дополнительных работ по разборке муфт вынуждены производить испытание двигателей совместно с механизмами. В этом случае соответствующее разрешение на пуск должно быть получено также от работников механомонтажа. Пробный пуск без механизма обуславливается, как правило, не проверкой исправности двигателя, а необходимостью произвести настройку схемы управления.

В практике наладочных работ принято предварительно испытывать без механизмов все крупные и средние двигатели постоянного тока, синхронные и асинхронные двигатели с фазным ротором, а также двигатели приводов, имеющих тяжелый запуск (насосы, компрессоры). Пуск двигателя должен быть тщательно подготовлен и произведен с максимальной осторожностью.

Подготовка пробного пуска. Перед подачей на схему машины рабочего напряжения выполняются следующие подготовительные операции (некоторые из них выполняются повторно).

1) Осматривается внутренняя полость машины для проверки положения щеток, отсутствия посторонних предметов, контроля соединений между обмотками и пр.

2) Проверяются состояние подшипников и наличие в них масла.

3) Проверяется надежность заземления корпуса машины.

4) От руки, с помощью лома или крана, проворачивают якорь (ротор) двигателя, проверяя свободу его хода.

5) Реле максимальной защиты временно устанавливаются на ток срабатывания, не превышающий 200% номинального тока двигателя.

6) При ступенчатом пуске реле ускорения с помощью деревянных кольев заклиниваются в положениях, при которых исключается выведение пусковых сопротивлений.

7) Мегомметром проверяется изоляция силовых цепей и цепей управления совместно с обмотками двигателя.

8) В цепь якоря для контроля пусковых токов включается амперметр.

9) В современных системах авторегулирования нередко предусматривается включение двигателей на открытый нонный или тиристорный преобразователь с расчетом на действие токоограничения. Во время пробного пуска разгон следует производить путем потепенного открытия выпрямителей. Аналогично осуществляется разгон двигателей при управляемых генераторах и магнитных усилителях (в системах Г—Д и МУ—Д).

При испытании двигателя на ходу наладчик должен соблюдать общие правила безопасности, а при первых пусках проявить особую осторожность.

Следует предусмотреть аварийное снятие напряжения в случае отказа действия схемы управления или приваривания контактов пусковых аппаратов. Для этого рекомендуется обеспечить быстрое отключение автомата ввода. В некоторых случаях необходимо предусмотреть возможность осуществления электрического или механического торможения.

Необходимо принять меры защиты исполнителей и окружающего персонала: установить ограждения, вывесить плакаты, пользоваться резиновым ковриком, перчатками и т. п.

В испытаниях должны участвовать представители электромонтажной организации и службы эксплуатации, а при пуске с механизмом — также представитель механомонтажа.

Первый пуск — толчок двигателя. Предварительно следует расставить наблюдающих за работой электрической и механической частями привода, четко определив обязанности каждого участвующего в испытании. Первое включение электродвигателя производится

толчком продолжительностью 1—2 сек. Двигатель разгоняется и тормозится на выбеге. При толчке двигателя проверяются: а) направление вращения; б) состояние ходовой части; в) величина пускового тока и надежность действия отключающих устройств; г) действие максимальной защиты и других элементов схемы управления.

Толчок двигателя целесообразно повторить 2—3 раза, постепенно увеличивая длительность включения. При этом проверяется согласованность обмоток, настраиваются заданные уставки токоограничения и максимальной защиты.

Кратковременное включение и разгон до полной скорости. Убедившись в надежности пусковых устройств и получив от механиков подтверждение исправности механической части, можно произвести включение двигателя на более продолжительное время. Двигатель разгоняется и достигает установившейся скорости вращения, соответствующей выведенному пусковому сопротивлению. Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором при этом разгоняются полностью, а синхронные — входят в синхронизм.

При пуске двигателя совместно с приводом необходимо следить, чтобы не перегрелись пусковые сопротивления. После достижения установившейся скорости двигатель отключается.

За время включения двигателя наладчик должен убедиться в хорошем состоянии ходовой части: отсутствии вибраций, нормальном захвате масла подшипниковыми кольцами и т. п.; у машин постоянного тока оценивается коммутация щеток. Если состояние двигателя и работа схемы управления оказываются нормальными, производятся повторные включения; при ступенчатом пуске постепенно выводятся ступени сопротивления, двигатель выходит на естественную характеристику и достигает полной скорости. В дальнейшем ходе испытаний двигателей, для которых схемой предусмотрено регулирование скорости вращения, проверяется их работа на повышенных скоростях.

При всех описанных пробных испытаниях отключение двигателя наладчиком должно производиться немедленно, без предупреждения во всех случаях получения сигнала о неисправностях схемы управления, машины или механизма привода.

Длительное включение двигателя и обкатка совместно с механизмом. При удовлетворительных результатах пробных пусков двигатель включается на 20—30 мин. Проверяется нагревание подшипников, обмоток и железа. За это время детали даже небольшой машины не успевают нагреться до установившейся температуры, но по характеру ее нарастания можно судить, нет ли в какой-либо части машины избыточного выделения тепла. Повреждение обмоток машины проявляется также характерным запахом горелой изоляции, который во многих случаях обнаруживается раньше, чем обмотка успевает заметно нагреться.

Если двигатель соединен с механизмом, работающим продолжительно, например, с транспортером или вентилятором с закрытой задвижкой, то пуск и проверка его работы выполняются аналогично испытанию двигателя без механизма.

После пробного включения на 20—30 мин производится длительное включение двигателя с механизмом на обкатку. Обкатка, производимая в течение 8 ч или более, служит для шлифовки подвижных связей механизмов, выявления слабых мест схемы управления и проверки электрооборудования на нагревание. В отличие от предыдущих пусков режим испытания при обкатке диктуется механиками, производившими монтаж технологической части установки.

Двигатели, допускающие только повторно-кратковременный режим работы (например, крановые и металлургические), соединенные обычно с механизмами, имеющими ограниченный ход, обкатываются по специально составленному графику или в условиях эксплуатации.

Глава вторая

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2-1. Проверка механической части и правильности установки щеток

Для контроля состояния машины постоянного тока, подвергаемой разборке или частичной ревизии на месте монтажа, следует произвести тщательный осмотр всех деталей и выполнить ряд измерений (рис. 2-1).

Необходимо провести следующие операции.

1. Проверить воздушный зазор в диаметрально противоположных точках под полюсами; у крупных машин рекомендуется, выбрав ка-

кую-либо точку на якоре, проверить зазор, между ней и всеми полюсами при постепенном повороте якоря; зазоры не должны отличаться друг от друга более чем на 10% среднего значения зазора.

2. Тщательно осмотреть и сверить с чертежами пайки или болтовые соединения обмотки в местах разъема индукторов, а также убедиться в отсутствии зазора в месте сочленения обеих половин магнитопровода.

3. Осмотреть бандажи, клинья в пазах, пайку петушков, состояние лобовых соединений обмоток, коллектор.

4. Проверить состояние коллектора. Поверхность коллекторов новых машин должна быть отшлифована, на ней не должно быть вмятин, царапин, западающих и выступающих пластин. Биеение коллектора не должно превышать 0,03 мм при диаметре до 250 мм, 0,04 мм при диаметре до 500 мм и 0,05 мм при диаметре выше 500 мм. Шлифовать коллекторы машин, бывших в эксплуатации, следует только при паличии значительного обгара и сильного искрения щеток, так как шлифовка уничтожает политуру и ускоряет износ коллектора.

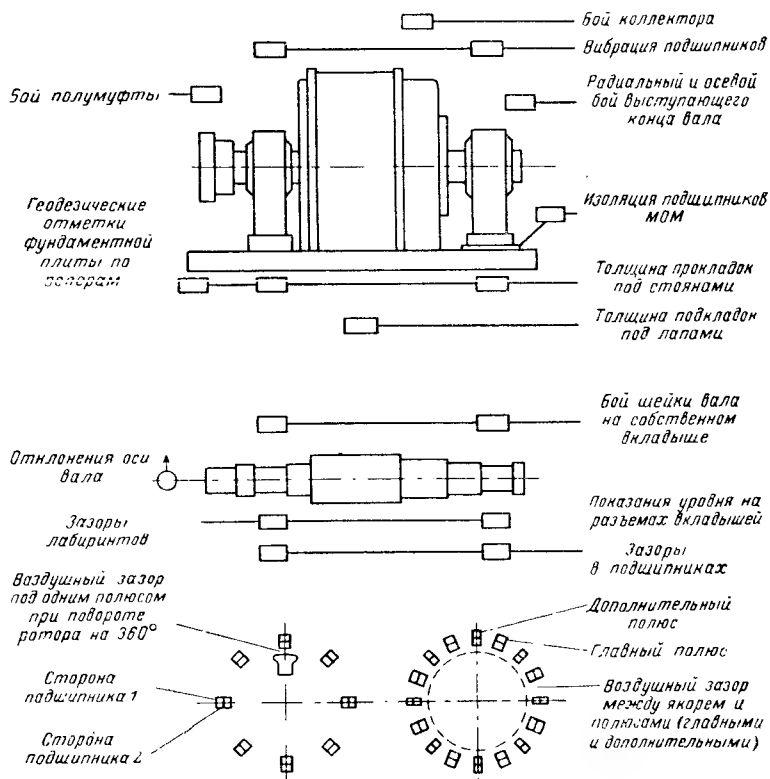


Рис. 2-1. Основные измерения при монтаже электрической машины (монтажный формуляр).

В новых машинах изоляция между коллекторными пластинами должна быть продорожена на глубину 1—2 мм. В отремонтированных машинах после проточки коллектора и продоразживания острые кромки пластин должны быть сняты. Шлифовка коллектора производится стеклянной бумагой № 00, прикрепленной к деревянной колодке, вырезанной по форме коллектора.

5. При внешнем осмотре машин, бывших в длительной эксплуатации, необходимо оценить состояние изоляции обмоток. Во многих случаях мегомметр показывает высокое сопротивление изоляции, но в отдельных местах, например у краев пазов или на лобовых соединениях, изоляция оказывается настолько пересушенной, что не может быть отремонтирована, и во избежание аварии требуется перемотка машины. Пересушенная изоляция обычно расслоена и осыпается при небольших постукиваниях и перегибах. Во время длительной эксплуатации изоляция и медь обмоток стареют; от вибрации детали становятся ломкими. Наладчик электрооборудования должен ориентироваться в этих вопросах, и для приобретения необходимого опыта ему следует изучить работу электроремонтного цеха [Л. 11, 12].

Проверка правильности установки щеток. Расстановка щеток должна быть произведена согласно заводскому чертежу и инструкции. В общем случае при проверке машин можно руководствоваться следующими рекомендациями.

1. Щеткодержатели должны быть установлены таким образом, чтобы щетки стояли строго параллельно пластинам коллектора и расстояния между их сбегающими краями были равны полюсному делению. Допускаются отклонения от средней величины полюсного деления (измеренного по коллектору) не более 2% для машин до 200 квт, 0,5% для машин свыше 200 квт.

2. Щетки отдельных траверс следует сдвигать вдоль оси машины с таким расчетом, чтобы в коммутации участвовала вся рабочая поверхность коллектора (рис. 2-2) и происходило равномерное срабатывание пластин. Расстояние обойм щеткодержателей от поверхности коллектора в зависимости от размеров коллектора и щеток должно быть не более 2—4 мм. При наклонных щеткодержателях коллектор должен набегать на острый угол щеток.

3. Щетки должны свободно перемещаться в обоймах, но не иметь излишней слабину. Нормальный зазор между щеткой и обоймой в направлении вращения 0,1—0,4 мм, в продольном направлении 0,2—0,5 мм.

4. Нормальное удельное давление щеток на коллектор в зависимости от марки щеток равно 150—250 Г/см². Во избежание неравномерного распределения тока давление отдельных щеток не должно отличаться от среднего давления более чем на 10%.

Износ щеток в процессе эксплуатации зависит от механических и электрических факторов. К первым относятся состояние поверхности и линейная скорость коллектора, удельное давление щеток, вибрация машины. Износ щеток зависит от средней величины и от

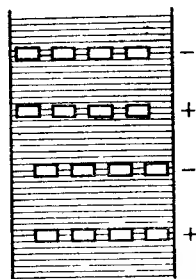


Рис. 2-2. Расстановка щеток по коллектору.

пульсации якорного тока; нередко износ резко увеличивается под влиянием искрения.

Эксплуатационники периодически заменяют сработавшиеся щетки, причем нет четких критериев того, какую щетку можно еще оставить. Например, на одинаковых крупных машинах в равных условиях заменяются щетки длиной 30 или 15 мм. В общем случае представляется допустимым срабатывание щетки до 40% ее первоначальной длины.

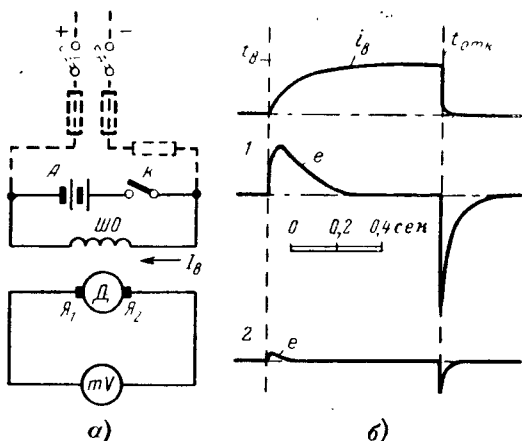


Рис. 2-3. Определение нейтрального положения щеток индуктивным методом.

a — схема; *б* — осциллограммы, иллюстрирующие изменение э. д. с. на щетках машины; I_b — ток в цепи обмотки возбуждения; *e* — э. д. с. на щетках; t_b — момент включения тока возбуждения; $t_{отк}$ — момент отключения тока; 1 — щетки сдвинуты с нейтрали на 5 мм; 2 — щетки сдвинуты с нейтрали на 1 мм.

5. В коммутации должна участвовать по возможности вся длина коллектора, но щетки не должны свисать за край коллектора (с учетом разбега вала), а щеточные медные гуды во избежание случайного касания должны быть достаточно удалены от петушков якоря. Щетки должны быть тщательно пришлифованы к поверхности коллектора с помощью стеклянной (но не карборундовой) шкурки с зернами средней крупности. Следует учесть, что при шлифовке не должны быть подрезаны края щеток.

После проведения указанной проверки и выполнения монтажным персоналом (в случае необходимости) требуемой регулировки щетки устанавливаются на электрическую нейтраль.

Установка щеток на электрическую нейтраль. Точное расположение щеток по нейтрали определяет оптимальные параметры машин: а) двигатели имеют максимальный момент; б) генераторы имеют максимальное напряжение; в) реакция якоря минимальна; г) щетки замыкают накоротко секции обмотки, расположенные вне поля главных полюсов, что необходимо для получения безыскровой коммутации.

Проверка положения щеток относительно нейтрали может быть произведена различными способами: а) индуктивным методом; б) по наименьшей скорости двигателя; в) по наибольшему напряжению генератора; г) методом самовозбуждения от остаточного магнетизма при коротком замыкании.

Особенно удобен при наладке индуктивный метод, дающий возможность определить нейтраль при неподвижной машине с наибольшей точностью. Определение электрической нейтрали индуктивным методом производится с помощью вольтметра магнитоэлектрической системы на напряжение до 3 в (желательно с нулем посредине) и аккумулятора или сухой батареи на 2—6 в. Вольтметр подсоединяется к щеткам машины Я1—Я2 (рис. 2-3); параллельная обмотка ШО при испытании включается (ключом К) импульсами на напряжение аккумулятора А.

В момент включения параллельной обмотки стрелка вольтметра дает бросок (отклонение) в одну сторону, а затем возвращается к нулю; при отключении параллельной обмотки ШО стрелка отклоняется в обратную сторону. Величина отклонения стрелки зависит от смещения щеток с нейтрали (см. осциллограмму на рис. 2-3). При отсутствии аккумулятора может быть использована сеть постоянного тока, но в этом случае последовательно с параллельной обмоткой должно быть включено добавочное сопротивление, снижающее ток возбуждения не менее чем в 10—20 раз.

При наладке новых машин нейтраль обычно не устанавливается, а только проверяется. Отыскание нейтрали машин, прошедших капитальный ремонт, рекомендуется проводить по схеме на рис. 2-3, а в следующем порядке;

- а) заметить отклонение вольтметра при включении и отключении параллельной обмотки;
- б) отпустить болты, крепящие траверсу щеткодержателей;
- в) переместить траверсу на 1—2 мм и заметить новые значения отклонений вольтметра (если новые отклонения меньше предыдущих, то направление смещения траверсы правильное); путем незначительных смещений находится такое положение траверсы, при котором отклонение вольтметра будет наименьшим;
- г) проверить от руки якорь и проверить положение нейтрали, если новому положению якоря соответствует новое положение нейтрали (обычно расхождения незначительны), то следует установить траверсу в среднее положение между обеими отметками;
- д) укрепить траверсу щеткодержателей и повторно проверить нейтраль, так как при закреплении траверсы нередко смещаются щетки.

2-2. Измерение сопротивлений и проверка схемы соединений обмоток

Измерение сопротивления обмоток. Усредненные величины сопротивлений обмоток машин определенных типов приводятся в информационных материалах [Л. 15, каталоги]. Заводы—изготовители крупных машин выдают протоколы приемо-сдаточных испытаний; во время наладки согласно требованиям ПУЭ [Л. 18] у большинства машин измеряется сопротивление

ние параллельной обмотки. Сопротивления последовательных обмоток измеряются только у крупных машин, используемых в системах быстродействующего управления.

Значение сопротивления параллельных обмоток возбуждения машин постоянного тока, измеренное при наладке, обычно отличается от заводских (каталожных) данных не более чем на 3—8%. Отклонения в величинах сопротивлений параллельных обмоток иногда имеют место из-за использования на заводах, изготавливающих машины, сечений и сорта обмоточной меди, не точно соответствующих первоначальным расчетам. Сравнимые величины сопротивлений, естественно, приводятся к одной температуре, обычно 20° С; в случае неточной оценки температур возникнут расхождения показаний.

Повышенное сопротивление параллельной обмотки может вызвать увеличение скорости и уменьшение момента двигателя; при пониженном сопротивлении для получения номинальной скорости и снижения температуры обмотки может потребоваться установка добавочного сопротивления.

Согласно ГОСТ 183-66 на электрические машины допустимое отклонение величины фактической скорости двигателя от каталожной составляет $\pm 20\%$; допустимое отклонение величины напряжения генератора от номинального значения $+20\%$ (отклонение в сторону снижения не ограничивается). Пригодность параллельной обмотки с отличающимся от каталожного значением сопротивления может быть установлена только после испытания машины на ходу и снятия внешней характеристики.

Сопротивление последовательных обмоток машины может быть измерено методом вольтметра—амперметра, с помощью двойного моста или микроомметра (см. § 1-4 и 1-8).

Известную трудность представляет измерение сопротивления обмотки якоря. В заводских формулах обычно указывается сопротивление, измеренное между коллекторными пластинами на расстоянии полюсного шага. Современные машины могут иметь различные схемы обмоток и дробное число коллекторных пластин на полюс. Измерение сопротивления якоря малых и средних машин следует производить при поднятых щетках; в крупных машинах параллельные соеди-

нения, создаваемые щетками, мало влияют на результат измерения.

При выборе расстояния по коллектору, на котором требуется измерять сопротивления якоря, можно руководствоваться соображениями, перечисленными ниже.

1. Небольшие машины постоянного тока мощностью до 2—3 кВт и тахогенераторы изготавливаются обычно с петлевыми обмотками без уравнительных соединений. Для измерения сопротивления якоря такой машины требуется поднять щетки и подвести щупы от измерительной схемы (например, двойного моста) к противостоящим по диаметру пластинам коллектора.

Пример 1. а) Пусть число пластин 80, тогда измерение производится между 1-й и 41-й пластинами.

б) При нечетном числе пластин — 81 измерение может производиться между 1-й и 41-й или 1-й и 42-й пластинами.

Полученный результат R'_π в $2p$ раз превосходит сопротивление якоря

$$R_\pi = \frac{R'_\pi}{2p},$$

где $2p$ — число полюсов машины.

2. Для измерения сопротивления якоря крупной или средней машины расстояние (шаг) по коллектору в пластинах N_p , на котором требуется подвести щупы от измерительной схемы, определяется путем деления числа коллекторных пластин N на число полюсов $2p$.

Пример 2. а) $N=420$; $2p=6$; обмотка петлевая; тогда

$$N_p = \frac{N}{2p} + 1 = \frac{420}{6} + 1 = 71.$$

б) $N = 125$; $2p = 4$; обмотка волновая; тогда

$$N_p = \frac{125}{4} + 1 = 32,25;$$

принимается $N_p=32$.

в) $N=360$; $2p=6$; обмотка волновая двухходовая;

$$N'_p = \frac{360}{6} + 1 = 61.$$

Так как обмотка двухходовая, требуется увеличить N'_p на одно деление. Принимается $N_p=62$.

3. Во многих случаях достаточно определить сопротивление якоря приближенно, причем полученная величина может быть проверена по заводским данным. Для такого измерения не требуется поднимать щетки, рассчитывать шаг N_p по коллектору, выяснять схему обмотки и т. п. Щупы измерительной схемы прикладываются

ются к коллектору у сбегающих краев щеток смежных траверс плюс одна пластина. Если полученный результат измерения не совпадает с заводскими данными, следует повторить измерение, смещая щуп на одну пластину в обе стороны.

Пределы допустимых отклонений измеренной величины сопротивления обмотки якоря от каталожных данных или формуляра заводских испытаний ПУЭ не нормируются и определяются наладчиком путем анализа в каждом конкретном случае. Обычно расхождение данных измерений является следствием неточности измерений или влияния температурного фактора.

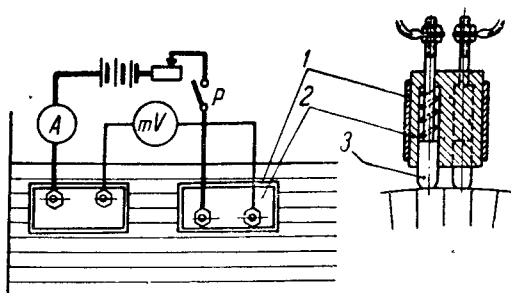


Рис. 2-4. Двухконтактный щуп для измерения сопротивления обмотки якоря между смежными коллекторными пластинами.

1 — обойма щетки; 2 — текстолитовая колодка; 3 — латунный нажимной щуп.

Для расчета режимов управления приводом иногда требуются данные полного сопротивления цепи якоря совместно со щетками, дополнительными полюсами и другими последовательными обмотками. Искомое сопротивление приблизительно может быть получено путем его измерения методом амперметра—вольтметра (подключаемых на выводы якорной цепи) при нескольких положениях проворачиваемого якоря.

В ряде случаев при отыскании повреждений якорной цепи или проверке правильности пайки обмоток во время ремонта требуется произвести измерение сопротивлений между каждой парой соседних пластин коллектора. Такие измерения следует производить с помощью микроомметра или методом вольтметра (милливольтметра) — амперметра. Для удобства рекомендуется изготовить двойные щупы с пружинами в изоляционной

рукоятке. При измерении щупы перемещаются по окружности коллектора.

Для проверки машин среднего габарита, легко проворачиваемых от руки, удобно пользоваться специальными щупами (рис. 2-4), приспособленными для установки в обойму щеткодержателя. После каждого замера якорь проворачивается на одну коллекторную пластину.

Проверка внутренних соединений и схемы подключения машин к сети. В машинах постоянного тока, выполненных по ГОСТ 183-66 и работающих в режиме двигателя при правом вращении, во всех обмотках (кроме размагничивающей—противокомпаундной) ток проходит от начала 1 (+) к концу 2 (—).

Обозначение выводов обмоток машин отечественного изготовления приведено в табл. 2-1.

Таблица 2-1

Наименование обмотки	ГОСТ 183-66	
	Начало	Конец
Обмотка якоря	Я1	Я2
Компенсационная обмотка	К1	К2
Обмотка добавочных полюсов	Д1	Д2
Последовательная обмотка возбуждения	С1	С2
Параллельная обмотка возбуждения	Ш1	Ш2
Уравнительная обмотка	У1	У2
Пусковая обмотка	П1	П2
Обмотка особого назначения	01; 03	02; 04

При наличии в машине нескольких обмоток одного наименования их начала и концы, помимо буквенных обозначений, должны иметь цифровые обозначения: 1—2, 3—4, 5—6 и т. д.

При наладке должны быть проверены соответствие включения параллельной и последовательной обмоток возбуждения и взаимная полярность главных и добавочных полюсов. После капитального ремонта машины должно быть проверено также включение добавочных полюсов по отношению к якорю и компенсационной обмотке. Методы проверки приведены ниже.

Соответствие полярности параллельной и последовательной (подмагничивающей) обмоток возбуждения может быть прове-

рено индуктивным методом или путем пробных включений машины. При индуктивном методе к обмоткам возбуждения, как указано на рис. 2-5, подключаются вольтметр (на 1—3 в) и аккумулятор. Полярность вольтметра предварительно должна быть проверена по маркировке зажимов аккумулятора. При согласном включении обмоток стрелка прибора отклонится в момент кратковременного замыкания ключа *K* вправо, а при размыкании — влево.

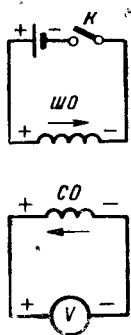


Рис. 2-5. Проверка и согласование полярности обмоток параллельного и последовательного возбуждения индуктивным способом.

Взаимная полярность может быть также проверена путем кратковременного включения — толчка двигателя, возбуждаемого одной параллельной, а затем одной последовательной обмоткой. При согласном включении в обоих случаях будут одинаковы полярность полюсов и направление вращения якоря.

Установившаяся скорость при включении одной параллельной обмотки будет выше, чем при работе обеих согласно включенных обмоток.

Порядок чередования главных и добавочных полюсов машин должен соответствовать табл. 2-2.

Таблица 2-2

	В двигателях	В генераторах
Направление вращения машины	$\rightarrow$	$\rightarrow$
Чередование полюсов	$N - n - S - s$	$N - s - S - n$

Примечание. *N, S* — главный северный и южный полюса; *n, s* — добавочные полюса.

В двигателях, считая по ходу вращения, за главным полюсом следует одноименный добавочный; в генераторах за главным полюсом — добавочный другой полярности.

Чередование полюсов может быть проверено с помощью магнитной стрелки, поочередно подносимой с наружной стороны станины к головкам болтов. Если полярность стрелки неизвестна (например, при использо-

вании иглы или пера, подвешенных на нитке), то полярность полюсов указывается условно. Полученные результаты сравниваются с данными, приведенными в табл. 2-2.

Полярность главных и добавочных полюсов можно определить с помощью вспомогательной катушки K , помещаемой в зону потока рассеяния Φ_p и милливольтметра mV (рис. 2-6). Обозначим буквой H вывод катушки, от которого (если смотреть со стороны машины) витки направлены по часовой стрелке, и подсоединим его к зажиму $+$ милливольтметра. Если катушку приближать к северному полюсу N вдоль его оси, то стрелка милливольтметра отклонится вправо; при удалении катушки стрелка отклонится влево. Около южного полюса S стрелка будет отклоняться в обратном направлении.

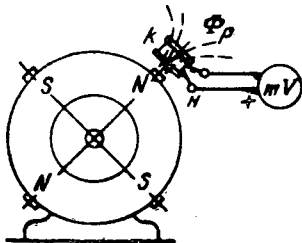


Рис. 2-6. Проверка полярности полюсов машины с помощью вспомогательной катушки.

Проверка взаимного включения якоря и добавочных полюсов. Машины постоянного тока независимо от направления вращения и от того, работают ли они в качестве двигателя или генератора, имеют одинаковое соединение якоря и добавочных полюсов. Это соединение обычно выполняется внутри машины и подлежит проверке только после ее капитального ремонта. Для этой цели к якорю подключается через рубильник источник постоянного тока (батарея), а к добавочным полюсам — милливольтметр (рис. 2-7). В тех случаях, когда обмотки добавочных полюсов чередуются с участками компенсационной обмотки, вольтметр подключается на их общие выводы. Путем переключений подбирается такое присоединение вольтметра, при котором в момент включения батареи стрелка прибора отклоняется вправо (в положительном направлении). Полярность обмоток отмечается мелом.

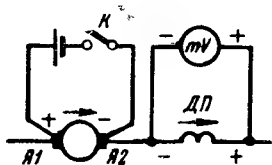


Рис. 2-7. Проверка правильности взаимного включения якоря и добавочных полюсов.

При правильном включении н. с. компенсационной обмотки КО и добавочных полюсов ДП

направлены против н. с. якоря. Поэтому якорь и ДП должны быть соединены одноименными условными выводами (см. рис. 2-7), т. е. плюс якоря с плюсом ДП (или минус якоря с минусом ДП).

Магнитные потоки компенсационной обмотки КО и обмотки добавочных полюсов ДП должны быть направлены согласно. При отдельных обмотках ДП и КО их взаимная полярность может быть проверена индуктивным методом аналогично согласованию последовательной и параллельной обмоток (рис. 2-8). После определения полярности выводов обмотки соединяются последовательно разноименными полюсами, т. е. плюс одной обмотки с минусом другой. При этом их н. с. действуют согласно.

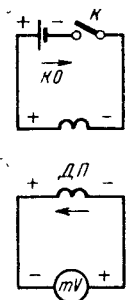


Рис. 2-8. Проверка правильности взаимного включения компенсационной обмотки и добавочных полюсов.

В крупных машинах, у которых ДП чередуются с участками КО, полярность последней может быть проверена путем просмотра направления намотки витков (по ходу тока) с соответствующей разметкой мелом торцов стержней обмотки.

При наладке схем электроприводов с обратной связью по напряжению может потребоваться знание полярности щеток и соответствующих выводов. В данном случае исходными величинами служат заданная полярность главных полюсов и направление вращения. Искомая полярность щеток может быть найдена одним из следующих способов.

1. К двум точкам коллектора *a* и *б*, отстоящим примерно на равном расстоянии от разноименных смежных щеток (рис. 2-9), присоединяется вольтметр. Производится включение возбуждения, стрелка вольтметра дает кратковременное отклонение. Если в момент включения при указанной маркировке зажимов его стрелка отклоняется вправо, то плюс — в точке *a*, минус — в точке *б*. Такую же полярность имеют ближайшие щетки, расположенные против направления вращения.

2. В обмотку возбуждения машины подается ток возбуждения заданной полярности. К щеткам якоря подключается вольтметр со шкалой 15—30 в, после чего якорю дается небольшой толчок в сторону заданного

вращения машины от руки, рычагом, талью или краном. Отклонение стрелки вольтметра покажет полярность щеток.

Выше рассмотрены простые приемы проверки полярности полюсов и согласования обмоток, основанные на законе взаимной индукции. У новых, в особенности у крупных машин, ошибки во внутренних соединениях встречаются редко. Однако наладчик в данных вопросах должен свободно ориентироваться, ибо неправильные соединения в машинах постоянного тока не всегда выявляются при опробовании механизмов и могут привести к аварийному состоянию во время эксплуатации.

Так, например, неправильное подключение добавочных полюсов не обнаруживается при малых токах якоря и только после возрастания нагрузки появится прогрессирующее искрение на коллекторе; неправильно включенная последовательная обмотка двигателя также только с увеличением нагрузки на валу приведет к возрастанию скорости вращения и повышенному потреблению тока из сети. Поэтому в первые дни работы механизмов под нагрузкой требуется особенно внимательное наблюдение за поведением машин, состоянием коллектора, скоростью вращения и потребляемым из сети током.

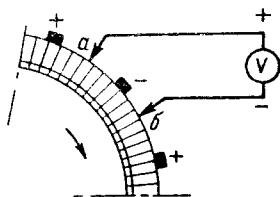


Рис. 2-9. Согласование полярности щеток, направления вращения и полярности главных полюсов.

2-3. Подъем напряжения генератора постоянного тока

Разгон генераторов или возбуждателей производится от приводных асинхронных или синхронных двигателей, включаемых предварительно толчком, а затем на короткие промежутки времени. Пробные пуски следует выполнить при отключенной обмотке возбуждения генератора. В этом случае на якоре генератора может быть только небольшое напряжение (2—10% от номинального), обусловленное наличием остаточного магнетизма.

На заводах-изготовителях обычно производится обкатка машин, но перед подъемом напряжения все же желательно вращать генератор без возбуждения хотя

бы 1—2 ч. При этом проверяется ходовая часть, полируются щетки и устанавливается правильность соединений якоря. Ошибочные соединения, приводящие к перегреву отдельных витков, но не вызывающие искрения, опытные наладчики и эксплуатационники обычно выявляют по запаху.

Ток возбуждения генератора в начале испытаний увеличивается постепенно, ступенями, пока напряжение на якоре не достигнет 130% номинального. При этом максимальное напряжение между соседними коллекторными пластинами не должно превышать 24 в.

Во время подъема напряжения необходимо внимательно следить за коммутацией щеток. В случае появления искрения необходимо снизить возбуждение, а иногда даже выключить и (при наличии средств торможения) резко затормозить приводной двигатель генератора. Продолжение испытания допустимо только после устранения причины искрообразования.

Первый подъем напряжения производится без записи показаний приборов.

Согласно требованиям ПУЭ [Л. 18] напряжение (э. д. с.) генератора в течение 1 мин должно поддерживаться на высшем пределе, равном $1,3U_n$ (соответствующем наибольшему значению тока возбуждения $+I_{в.м.}$), а затем постепенно, ступенями снижаться до нуля. Генераторы, работающие с изменением полярности, испытываются при полном перемагничивании. Для изменения полярности переключаются выводы обмотки возбуждения генератора или возбuditеля. Генератор возбуждается до максимального напряжения обратной полярности, равного $1,3U_n$, после чего его ток возбуждения от величины $-I_{в.м.}$ снижается до нуля.

Следует отметить, что неосторожный подъем напряжения генератора может привести к образованию кругового огня на коллекторе, вызывающего тяжелые повреждения машины. В случае появления кругового огня необходимо осуществить резкое гашение поля генератора и остановку гонного двигателя. Поскольку наблюдающий за испытуемым генератором может отвлечься и вручную практически нельзя обеспечить мгновенное воздействие на отключающие устройства, требуется предусмотреть средства автоматической защиты.

Круговой огонь, представляющий собой короткое замыкание якоря, вызывает увеличение момента и тока

гонного двигателя. Поэтому максимальная токовая защита двигателя может быть использована и в качестве защиты от кругового огня. В схемах двигатель — генератор с асинхронными гонными двигателями нередко ограничиваются установкой автоматов, имеющих токовую защиту мгновенного действия с уставкой на 10-кратный номинальный ток и зависимую тепловую защиту. Подобная защита не может быстро реагировать на появление кругового огня. Из указанных соображений гонные двигатели средней и большой мощности должны снабжаться максимальной защитой мгновенного действия с уставкой не более 3-кратного номинального тока. Однако даже чувствительная токовая защита гонного двигателя действует с запаздыванием, обусловленным маховыми массами агрегата. Для обеспечения быстрого действия при испытании крупных генераторов контроль за коммутацией щеток желательно осуществлять с помощью фотоголовок, связанных с усилителями и с соответствующими защитными устройствами.

По условиям работы электропривода, а также с целью предохранения обмоток возбуждения от витковых перенапряжений в схеме управления часто предусматривается плавное — медленное гашение поля генератора. Эти условия несовместимы с необходимостью быстрого снижения возбуждения в случаях появления кругового огня. Поэтому в схемах крупных машин следует установить дифференцированную защиту и создать различную интенсивность гашения магнитного поля при нормальных рабочих режимах и на период испытаний.

Генераторы, используемые в современных системах авторегулирования, подвергаются форсированному возбуждению с последующей отсечкой. При этом не исключены перенапряжения в обмотках возбуждения и в якоре; для контроля форсированных режимов генераторы, по мнению автора, должны испытываться в значительно более тяжелых условиях, чем это предусмотрено нормами [Л. 18, 27].

Восстановление остаточного магнетизма генератора. Генераторы постоянного тока в ряде случаев теряют способность самовозбуждения. У новых машин такое явление может быть вызвано несоответствием полярности остаточного магнетизма и направления вращения машины, неправильным присоединением параллельной обмотки, потерей остаточного магне-

гизма от тряски при транспортировке и другими причинами. Возбудители, находящиеся в эксплуатации, иногда теряют остаточный магнетизм или меняют его полярность под действием реакции якоря генератора (или двигателя), которая вследствие большой индуктивности его обмотки возбуждения продолжает действовать в сторону перемагничивания полюсов уже после отключения обмотки возбуждения возбудителя.

Восстановить остаточный магнетизм требуемого направления можно следующим путем: на ходу машины проверяются полярность и величина напряжения якоря, создаваемого действием остаточного магнетизма при отключенной обмотке возбуждения. Если при подключении параллельной обмотки остаточное напряжение снижается, необходимо переключить выводы обмотки; если остаточное напряжение повышается, но незначительно, следует кратковременно полностью вывести реостат и добавочные сопротивления в цепи возбуждения.

Обычно генератор (возбудитель) легче возбуждается при холостом ходе, чем под нагрузкой, но для получения первичного самовозбуждения иногда целесообразно кратковременно замкнуть якорь накоротко. Положительные результаты получаются в тех случаях, когда реакция якоря усиливает основной магнитный поток.

При изменении полярности остаточного магнетизма возбудителя, находившегося в эксплуатации, или полной потере остаточного магнетизма требуется произвести намагничивание машины с помощью постороннего источника напряжения (от сети постоянного тока, выпрямителя или аккумулятора). Достаточная величина остаточного магнетизма может быть получена при токе возбуждения, равном $(0,2 \div 0,3) I_n$.

2-4. Пуск двигателя постоянного тока

Методика проведения пробных пусков двигателей, описанная в § 1-10, должна быть дополнена рядом замечаний по контролю качества изоляции, по проверке на отсутствие витковых замыканий якоря и оценке качества коммутации щеток. Согласно справочникам и действующим инструкциям сопротивление изоляции машин постоянного тока должно проверяться *при повышенных температурах* и отвечать требованиям, представленным в табл. 1-5. В правилах технической экс-

платации имеется общее указание о том, что машины напряжением до 800 в должны иметь сопротивление изоляции не менее 1 Мом, а для возбuditелей и ЭМУ допускается 0,5 Мом.

Новые машины, подлежащие пуску, как правило, имеют хорошую изоляцию, но в практике пуско-наладочных работ их не нагревают для проверки изоляции. Нередко вследствие влажности помещения машины имеют сопротивления изоляции ниже норм (см. § 1-10), но все же небольшие и средние машины включают на рабочее напряжение. Таким образом, в период пуска систематически нарушаются нормы. Ответственность берут на себя прорабы и мастера, полагаясь на свой опыт. В период испытаний на ходу машины подсыхают, и ко времени сдачи в эксплуатацию их изоляция уже соответствует нормам.

Таблица 2-3

Машины напряжением до 460 в

	<i>P, квт</i>			
	До 1	1—5	5—20	20—100
$\tau, ^\circ\text{C}$	15	20	25	40
$R, \text{ком}$	10	50	100	200
K_a	—	—	—	1,05÷1,15

Учитывая обширный опыт пуско-наладочных работ, автор считает возможным вынести на обсуждение новые условия допустимого включения машины. Рекомендуемые показатели сведены в табл. 2-3—2-5, в которых приняты обозначения: P — номинальная мощность при $PB=100\%$; τ — минимальная температура обмоток и коллектора, при которой должна быть измерена изоляция; R — показания мегомметра; K_a — коэффициент абсорбции.

При пробном пуске коммутация проверяется путем наблюдения за коллекторами во время толчков пускового тока, а затем при работе без нагрузки при максимальных напряжении и скорости. Степень искрения сопоставляется с классификационной шкалой ГОСТ 183-66.

Наладка качественной коммутации щеток в ряде случаев требует проведения специальных сложных работ

по регулировке элементов электрической машины и настройке переходных режимов системы управления. Этому вопросу посвящены многие книги [Л. 5, 6, 17, 24] и статьи в электротехнических журналах; в данной книге рассматриваются только основные положения, которые необходимо знать молодым инженерам, квалифицированным рабочим-эксплуатационникам и техникам-наладчикам.

Таблица 2-4

Машины напряжением 460—900 в при возможности плавного подъема напряжения на якоре (генераторы или двигатели в системах Г—Д)

	<i>P, квт</i>				
	До 20	20—100	100—500	500—2 000	2 000
$\tau, ^\circ\text{C}$	25	40	60	60	60
$R, \text{ком}$	100	200	500	800	1 000
K_a	—	$>1,05-1,1$	$>1,1$	$>1,15-1,2$	$>1,15-1,2$

Разгон и работа машины под нагрузкой должны проходить практически без искрения; однако достигнуть этого в ряде случаев удастся не сразу. С небольшим искрением (по ГОСТ класс 1^{1/2}), не вызывающим заметного повреждения коллектора и щеток, часто приходится мириться.

Таблица 2-5

Машины напряжением 460—900 в, питаемые от ионных или тиристорных выпрямителей

	<i>P, квт</i>				
	До 20	20—100	100—500	500—2 000	2 000
$\tau, ^\circ\text{C}$	40	60	65	65	65
$R, \text{ком}$	0,5	0,5	0,9	1,2	1,6
K_a	—	$>1,05-1,15$	$>1,1-1,15$	$\geq 1,2$	$\geq 1,2-1,3$

У машин, работающих в продолжительном режиме с редкими пусками и перегрузками, во время толчков тока допускается даже значительное искрение (по ГОСТ класс 2), при котором искры на большом количестве щеток имеют белое свечение и длину до 5—10 мм. Оце-

нить, насколько искрение является опасным и может ли быть продолжено испытание под током, можно только при наличии достаточного практического опыта, приобретаемого путем наблюдения за машинами в различных режимах работы. Во всех случаях, когда на отдельных щетках или на большей их части наблюдается появление искр длиной более 10—15 мм, следует немедленно приостановить испытание и косвенными методами выяснить причину плохой коммутации.

Окончательная проверка коммутации производится при комплексном испытании машины под нагрузкой в различных режимах работы. Недопустимое искрение может быть связано не только с дефектами машины, но и со схемой управления. От схемы управления зависят быстрота изменения тока в цепи якоря и в цепи возбуждения, максимальные значения толчков тока, индуктивность контура главного тока, соотношение тока якоря и магнитного потока машины в разные моменты времени.

Наибольшая скорость изменения тока di/dt и наибольшие пики тока обычно имеют место при контакторном управлении (рис. 1-6,а), когда в цепи якоря по ступеням выводятся пусковые сопротивления.

Примерная осциллограмма разгона и реверса двигателя, управляемого по такой схеме, приведена на рис. 2-10. Толчки пускового тока нередко превышают номинальный ток в 2,5 раза; нарастание пускового тока длится всего сотые доли секунды, и изменение магнитного потока дополнительных полюсов происходит медленнее изменения тока якоря. Такое явление может привести к искрению на коллекторе. Еще более резко изменяется ток якоря при реверсе. В тех случаях, когда толчки тока вызывают недопустимое искрение, желательно увеличить число ступеней пуска и торможения или, если это слишком сложно, увеличить выдержку времени реле ускорения и снизить тем самым интенсивность переходных процессов. Нередко опасное искрение воз-

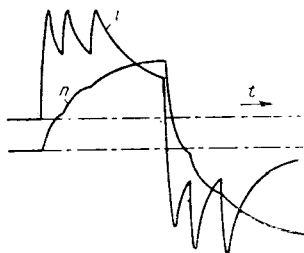


Рис. 2-10. Осциллограмма процессов пуска и реверса двигателя при контакторном управлении в функции времени.

никает только при относительно высоких скоростях; тогда диаграмму пуска целесообразно перестроить, как показано на осциллограмме рис. 2-11.

Для управления электродвигателями средней и большой мощности часто применяется система генератор — двигатель (рис. 1-7), при которой изменение скорости вращения двигателя до основной производится путем регулирования тока возбуждения генератора $I_{в.г.}$, а выше основной — уменьшением тока возбуждения двигателя.

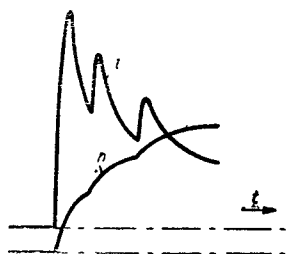


Рис. 2-11. Осциллограмма пуска двигателя с уменьшением толчков тока при повышении скорости.

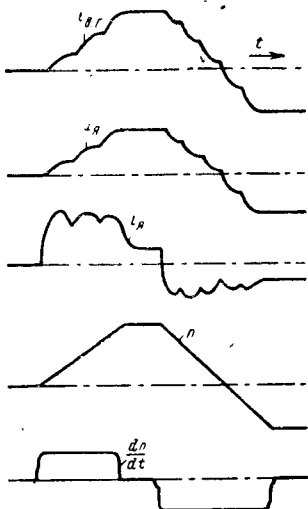


Рис. 2-12. Осциллограмма процессов разгона и торможения двигателя, управляемого по системе Г—Д с контакторным управлением в цепи возбуждения.

При ступенчатом выведении сопротивлений в контуре возбуждения генератора ток якорей машин $I_{я}$ изменяется значительно плавнее (рис. 2-12), чем при контакторном управлении в главной цепи; однако и в данной схеме безыскровая коммутация щеток во многом определяется настройкой режимов управления.

Показательной является настройка коммутации двигателей некоторых главных приводов реверсивных прокатных станов. В ряде случаев путем подбора щеток, регулировки добавочных полюсов и других обычных методов не удавалось получить удовлетворительную коммутацию, хотя двигатели были использованы по мощности не полностью. Безыскровая коммутация была до-

стигнута только после тщательной кропотливой настройки режимов управления, при которой наряду с повышением производительности стана были сглажены неблагоприятные толчки главного тока.

Следует отметить, что пульсации якорного тока, происходящие с большой частотой, во многих случаях не вызывают искрения щеток и в целом безвредны для машины. Такой режим работы характерен для двигателей, питаемых от управляемых выпрямителей. Ток якоря двигателя в системах УВ—Д за тысячные доли секунды может измениться на величину $(1 \div 1,5)I_{\text{н}}$ но магнитный поток дополнительных полюсов, а главное, реакция якоря изменяются только соответственно усредненному значению тока.

В современных системах Г—Д ток возбуждения генераторов автоматически регулируется по заданному закону из условий так называемого оптимального режима управления электроприводом. Типичными примерами могут служить режимы работы главных приводов реверсивных прокатных станов (блужингов, слябингов) и сходных по режиму реверсивных механизмов (нажимных устройств, манипуляторов, рабочих рольгангов и др.). По технологии производства указанные электроприводы действуют последовательно, и от их быстродействия зависит производительность крупнейших прокатных станов.

Допустимые параметры переходных процессов в практике проектирования и режимной наладки быстродействующих электроприводов определяют по ограничениям, накладываемым электрическими машинами и механизмами; применительно к ним находят оптимальные по быстродействию законы и структуры систем управления.

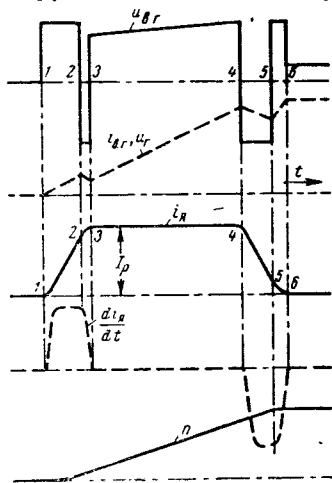


Рис. 2-13. Осциллограммы оптимального переходного процесса разгона реверсивного электропривода. Система Г—Д с ионным возбуждением.

Кроме того, при повторно-кратковременных режимах интенсивность переходных процессов регулируется с учетом максимально допустимого нагрева машины.

Оптимальное изменение параметров двигателей может быть получено в системах Г—Д с помощью управляемых ртутных выпрямителей и тиристоров, а при малых машинах — путем использования магнитных усилителей, тиратронов и транзисторов.

На рис. 2-13 представлены примерные осциллограммы оптимальных переходных процессов разгона реверсивного двигателя блюминга при холостом ходе. Изменение скорости n происходит по линейному закону с постоянным ускорением $dn/dt \approx \text{const}$; для этой цели поддерживается постоянная динамическая составляющая тока I_p , которая в данном случае вследствие отсутствия момента сопротивления равна полному току. Представленный переходный процесс осуществлен на ряде приводов прокатных станов. Он достигается путем безынерционного изменения напряжения $U_{в.г}$ на обмотке возбуждения генератора. Время нарастания и спада тока якоря i_a (участки 1-3 и 4-6) зависит от уровня напряжения $U_{в.г}$ и лимитируется величиной di_a/dt , допустимой для испытываемых машин.

2-5. Снятие характеристик при холостом ходе

После проведения пробных включений, установления исправности механической части машины и хорошей коммутации щеток снимаются характеристики машины.

Характеристиками машин принято называть [Л. 2] взаимную зависимость электрических и механических величин: напряжения на якоре, тока якоря, тока возбуждения, скорости вращения и момента на валу. Заводы-изготовители производят полные испытания и снятие всех характеристик при типовых испытаниях новых конструкций машин; всесторонне испытываются также крупные машины индивидуального изготовления; средние и особенно мелкие машины испытываются по сокращенной программе, и в прилагаемых к ним формулярах характеристики обычно отсутствуют [Л. 3, 5].

При пуске новых установок с машинами постоянного тока в практике наладки принято снимать следующие характеристики [Л. 9, 7].

1. У всех двигателей в режиме холостого хода измеряется скорость при номинальном напряжении на якоре и номинальном токе возбуждения; у приводов с небольшой статической нагрузкой, как, например, рольгангов, тележек кранов и др., скорость вращения двигателя может измеряться при подсоединенных механизмах.

2. У двигателей, имеющих регулировку скорости вращения, снимается регулировочная характеристика $n=f(I_{\text{в}})$ — зависимость скорости от тока возбуждения при неизменном напряжении на якоре.

3. У двигателей приводов продолжительного режима работы (например, транспортеров, вентиляторов, станков) измеряется скорость вращения при различных эксплуатационных режимах.

4. У генераторов систем Г—Д снимаются характеристики намагничивания (холостого хода) $E=f(I_{\text{в}})$ и короткого замыкания $e_{\text{к}}=f(I_{\text{я}})$ при неизменной скорости, где E , $e_{\text{к}}$ — э. д. с. якоря генератора; $I_{\text{в}}$, $I_{\text{я}}$ — ток возбуждения и ток якоря генератора.

5. У возбуждателей снимаются характеристики холостого хода и внешняя $U=f(I_{\text{я}})$ (у возбуждателей синхронных двигателей, сидящих на общем валу, снимается только внешняя характеристика).

При наладке сложных электроприводов часто возникает необходимость дополнительно к указанным испытаниям выполнить ряд специальных измерений величин махового момента, электромагнитной постоянной времени и снять характеристики привода в различных режимах работы. В приводах продолжительного режима работы требуется измерить момент нагрузки, для чего в свою очередь следует измерить потребляемую двигателем мощность и оценить потери энергии в двигателе.

Ниже описана рекомендуемая методика снятия характеристик и производства измерений при испытании вращающихся электрических машин.

Для оценки эксплуатационных возможностей электропривода и получения контрольных расчетных величин в первую очередь снимаются характеристики всех электрических машин при холостом ходе. Что касается характеристик машин под нагрузкой, то они снимаются только у отдельных исследуемых электроприводов в процессе опытной эксплуатации.

Снятие регулировочной характеристики двигателя $n=f(I_{\text{в}})$. При проектировании по

типовой характеристике намагничивания машины $\Phi = f(F_v)$ и заданному диапазону регулирования скорости $n_{\min} - n_{\max}$ рассчитывается невыключаемое сопротивление реостата в цепи возбуждения. Расчет ведется на основании простейших соотношений

$$E = C\Phi n; \quad n = \frac{E}{C\Phi}; \quad E = U - IR \approx U = \text{const} = K_1; \quad (2-1)$$

$$n = \frac{K_1}{C\Phi} = \frac{K}{\Phi}; \quad \Phi = \frac{K}{n}; \quad K = \Phi_n n_n, \quad (2-2)$$

где E, U, I — э. д. с., напряжение и ток якоря двигателя;

Φ — магнитный поток на полюс;

C, K_1, K — коэффициенты пропорциональности.

Коэффициент K , необходимый для расчета потока Φ (соответствующего заданным скоростям) находится по базовым величинам $K = \Phi_n n_n$.

По величине $n_{\max}$ рассчитывается $\Phi_{\min}$, из характеристики намагничивания определяется $I_{v.\min}$. Аналогично по максимально допустимому току возбуждения $I_{v.\max}$ определяется $\Phi_{\max}$ и рассчитывается $n_{\min}$.

Регулировочная характеристика дает возможность проверить результаты расчетов и отрегулировать величины установочных сопротивлений. При снятии характеристик двигатель испытывается во всем диапазоне регулирования скорости вращения; особое внимание уделяется проверке устойчивости работы в зоне минимального возбуждения.

Регулировочные характеристики снимаются при но-

минальном напряжении на якоре и отсутствии (или малой величине) статической нагрузки. На время испытания двигатель включается по нормальной рабочей схеме, но для расширения диапазона регулирования в цепи обмотки возбуждения может быть дополнительно

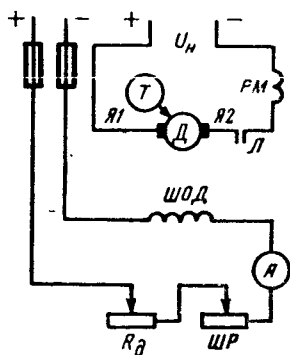


Рис. 2-14. Схема включения двигателя при снятии регулировочной характеристики.

установлен реостат R_d (рис. 2-14). Порядок снятия характеристики следующий.

1. Скорость двигателя путем постепенного введения реостата медленно увеличивается от основной, соответствующей полному возбуждению, до 110% верхнего нормированного предела. При значениях скорости, близких к максимальной, необходимо внимательно следить за коммутацией щеток. Если возникает искрение щеток или «качание» якоря, необходимо немедленно прекратить испытание, выяснить и устранить неисправность.

При снятии регулировочной характеристики в режиме холостого хода имеется возможность проверить, насколько устойчивой будет работа двигателя на высшей скорости под нагрузкой. Для этой цели приближение к верхнему пределу скорости следует повторить несколько раз, постепенно увеличивая быстроту введения реостата в цепи возбуждения. При резком увеличении скорости ток якоря двигателя достигает значительной величины, и если возрастающая реакция якоря не вызывает снижения основного магнитного потока, приводящего к дополнительному повышению скорости, то можно ожидать, что машина будет устойчиво работать также и под нагрузкой.

Установив надежность работы двигателя во всем диапазоне изменения скорости, можно приступить к снятию характеристик.

2. Ток возбуждения кратковременно повышается до значения, равного 1,2 номинального, и при этом значении снимается первая точка регулировочной характеристики; затем ступенями снижается возбуждение и снимаются семь-восемь точек в пределах до 110% макси-

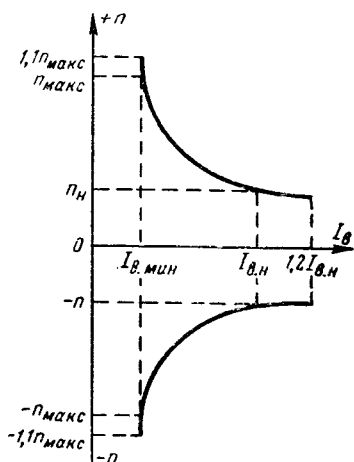


Рис. 2-15. Регулировочная характеристика двигателя с параллельным (независимым) возбуждением.

n_n — номинальная скорость при полном (номинальном) токе возбуждения $I_{b, \text{н}}$; $n_{\text{макс}}$ — максимальная скорость при минимальном допустимом токе возбуждения.

мальной рабочей скорости. Для реверсивных двигателей регулировочные характеристики снимаются при обоих направлениях вращения якоря. Одновременно с записью значений скорости и токов возбуждения следует регистрировать напряжение и ток якоря двигателя.

3. По данным измерений строятся характеристики (рис. 2-15). Если напряжение питающей сети U_c отличалось от номинального напряжения двигателя U_n , производится пересчет данных измерений скорости n' . С достаточной точностью можно

принять, что скорость прямо пропорциональна напряжению на якоре, и поэтому ее значение n , приведенное к U_n , находится из простого соотношения

$$n = n' \frac{U_n}{U'_c}.$$

4. Этим же соотношением пользуются в тех случаях, когда требуется получить регулировочную характеристику в расширенном диапазоне. Так как испытание при высокой скорости представляет опасность для двигателя или механизма, характеристика снимается при пониженном до 40—30% напряжении якоря, а затем приводится к его номинальному значению расчетным путем.

5. В системах генератор — двигатель снимаются характеристики $n=f(U_r)$, дающие зависимость скорости вращения двигателя от напряжения генератора. Каждая такая характеристика, соответствующая определенному неизменному току двигателя, представляет собой прямую линию (рис. 2-16).

Выше описано снятие регулировочных характеристик двигателей с помощью реостатов, вводимых в цепь возбуждения. В настоящее время широкое применение на-

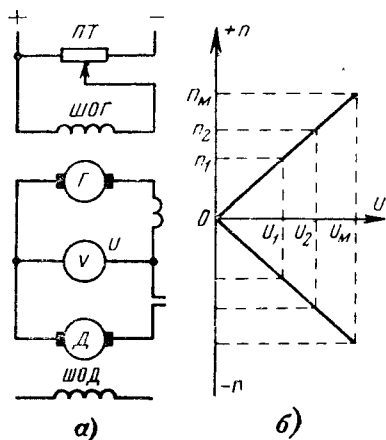


Рис. 2-16. Зависимость скорости двигателя от напряжения на якоре.

а — схема управления; б — характеристики изменения скорости двигателя при регулировании напряжения на якоре; $n_1, n_2, \dots, n_M$ — промежуточные и максимальные значения скорости двигателя, соответствующие напряжениям на якоре $U_1, U_2, \dots, U_M$.

ходят приводы, у которых возбуждение машин определяется работой магнитных усилителей или управляемых выпрямителей; для возбуждения крупных двигателей служат отдельные возбудители. Регулировочные характеристики таких машин целесообразно снимать при полной рабочей схеме силовых цепей и цепей возбуждения. Для обеспечения безаварийности следует собрать испытательные схемы, позволяющие постепенно, вручную, изменять управляющий сигнал усилителей. Перед снятием характеристик при неподвижных машинах необходимо проверить надежность испытательных схем и плавность регулирования токов возбуждения.

Снятие характеристик холостого хода генератора. Характеристика холостого хода $E = f(I_B)$ подобна кривой намагничивания машины $\Phi = f(I_B)$ (так как при $n = \text{const}$ $E = C\Phi n = K\Phi$) и служит для сопоставления с заводскими данными и анализа всех установившихся и переходных процессов управления. При снятии характеристики одновременно испытывается витковая изоляция обмотки якоря, проверяется коммутация щеток при холостом ходе и определяются предельные положения реостатов возбуждения.

Для снятия характеристики собирается схема, приведенная на рис. 2-17, а.

В случае отсутствия потенциометра $ПТ$ достаточной мощности обмотка возбуждения генератора ШОГ может быть включена через реостат по схеме, приведенной на рис. 2-17, б; снятие характеристик крупных гене-

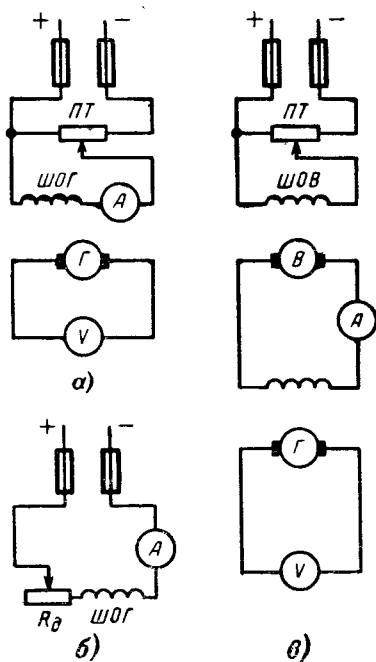


Рис. 2-17. Схемы регулирования тока возбуждения генераторов.

а — применение потенциометра $ПТ$; б — то же, но последовательно включен реостат R_d ; в — применение потенциометра для регулирования тока возбуждения возбудителя.

раторов можно производить путем изменения возбуждения возбудителя В.

При наличии бесконтактного усилителя в цепи возбуждения следует собрать испытательную схему, позволяющую вручную плавно изменять управляющий сигнал усилителя. Ко времени снятия характеристики намагничивания генератор должен быть испытан согласно методике, описанной в § 2-4.

Порядок снятия характеристики.

1. Генератор приводится во вращение и разгоняется до установившейся скорости.

2. Ток возбуждения генератора увеличивается постепенно, пока напряжение на якоре не достигнет 130% номинального. По мере подъема напряжения на восходящей ветви характеристики намагничивания (рис. 2-18) записывается 8—12 точек.

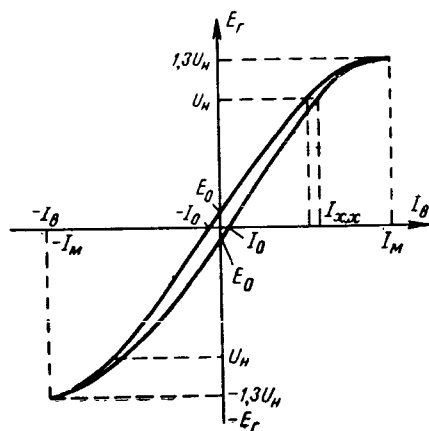
3. Генераторы, работающие с изменением полярности, возбуждаются до соответствующего отрицательного напряжения, равного $1,3U_n$, затем ток возбуждения плавно снижается до нуля. Записываются точки на каждой ветви; фиксируются токи возбуж-

Рис. 2-18. Характеристика намагничивания генератора.

дения, размагничивающие машину до нуля ($-I_0$ и $+I_0$), и остаточные напряжения генератора ($+E_0$ и $-E_0$).

Во время снятия характеристик ток возбуждения в пределах между крайними значениями следует изменять только в одну сторону без возврата к предыдущим значениям (например, при подъеме тока недопустимо частичное его снижение). В противном случае из-за влияния остаточного магнетизма будут получены не плавные, а ступенчатые характеристики. По результатам измерений строится характеристика намагничивания.

4. При испытании генераторов и возбудителей, предназначенных для работы без изменения полярности,



достаточно ограничиться снятием характеристики одностороннего намагничивания (рис. 2-19).

Снятие характеристики короткого замыкания генератора. Характеристики $I_{\text{я}} = f(I_{\text{в}})$, дающие зависимость тока якоря от тока возбуждения генератора при замкнутой накоротко якорной цепи, снимаются в случаях наладки генераторов, работающих параллельно или в схемах управления Г—Д.

Снятие характеристики короткого замыкания производится для контроля надежности контактных соединений главных цепей, определения реакции якоря при разных значениях тока и проверки отсутствия самовозбуждения, что может иметь место в схемах с гашением поля. Во время данных испытаний производится настройка аппаратов защиты и контроля величины тока (автоматов, максимальных реле, реле токоограничения), а также градуировка устройств автоматического бесконтактного управления в функции тока.

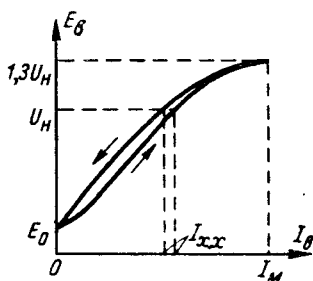


Рис. 2-19. Характеристика намагничивания возбуждателя.

Для снятия характеристики проводятся следующие подготовительные операции. Генератор приводится во вращение без подачи возбуждения; измеряется напряжение на якоре, создаваемое действием остаточного магнетизма. Обмотка возбуждения генератора включается через потенциометр. Желательно иметь потенциометр с двумя движками или использовать на обычном реостате вывод от средней точки (рис. 2-20,а). Можно воспользоваться также двумя потенциометрами по схеме на рис. 2-20,б. Путем последовательных перемагничиваний остаточный магнетизм, контролируемый по напряжению на якоре, снижается до нуля. Цепь главного тока генератора, в которую входят якорь, компенсационная обмотка, добавочные полюса и автомат главного тока, замыкается накоротко; собирается одна из схем испытаний, приведенных на рис. 2-20. Вводится в действие максимальная защита РМ и предусматривается аварийное размыкание якорной цепи. Данная предосторожность необходима в связи с тем, что при испытаниях

в случае неправильно установленных щеток или асимметрии магнитных потоков могут произойти самовозбуждение генератора и самопроизвольное чрезмерное нарастание тока.

При снятии характеристик генератора со смешанным возбуждением рекомендуется последовательную обмотку вывести из работы.

Испытание генератора в режиме короткого замыкания рекомендуется проводить в следующем порядке.

1. Подается напряжение на потенциометр (рис. 2-20); движок D плавно смещается от средней точки m до тех пор, пока ток в якорной цепи не достигнет номинальной величины.

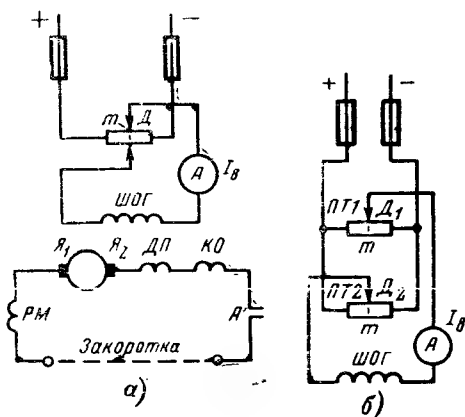


Рис. 2-20. Схемы включения генератора при снятии характеристик короткого замыкания.

2. При номинальном токе якоря необходимо задержать на 3—5 мин дальнейшее повышение возбуждения и проследить, не наблюдается ли самопроизвольное возрастание тока. Установив отсутствие самовозбуждения, производят с помощью потенциометра дальнейшее увеличение тока якоря до 150% номинального, а затем возвращают движок D к средней точке (т. е. уменьшают ток возбуждения до нуля). При испытании необходимо следить за коммутацией щеток генератора. Подъем и снижение тока якоря в пределах от I_n до $1,5I_n$ должны производиться достаточно быстро во избежание чрезмерного перегрева токоведущих частей.

3. Перемещением движка D от средней точки m в противоположном направлении перематывается генератор и при обратной его полярности повторяются операции, указанные в пп. 1 и 2.

4. Убедившись в устойчивой работе генератора при обоих значениях полярности, следует повторить его полное перематывание в пределах $\pm 1,5I_{\text{н}}$, записывая в трех-четырех точках каждой полуветви значения токов якоря и возбуждения. По данным измерений строится характеристика короткого замыкания, приведенная на рис. 2-21.

В системах авторегулирования для настройки узлов токоограничения и токовой отсечки ток якоря генератора приходится поднимать до значений $(1,8 \div 2,5)I_{\text{н}}$. Реле максимальной защиты настраиваются на ток $3I_{\text{н}}$, а иногда и более. Во время опыта короткого замыкания прохождение столь больших токов не представляет опасности для машины, если оно длится не более 2—5 сек [Л. 4]. За больший период времени (измеряемый десятками секунд) могут перегреться гибкие подводы к щеткам, распаяться петушки, подогреть щетки и пластины коллектора. Поэтому изменение возбуждения генератора следует производить таким образом, чтобы после каждого очередного измерения ток якоря вновь снижался до нуля. Необходимо иметь в виду, что сдвиг щеток с нейтрали против направления вращения всего на 3—4 эл. град может привести к увеличению тока якоря примерно вдвое (при том же возбуждении). Наклон характеристики короткого замыкания резко влияет переходное сопротивление щеток, в свою очередь зависящее от того, имеет ли место замедленная или ускоренная коммутация. Машины постоянного тока большой мощности вследствие действия компенсационной обмотки имеют обычно ускоренную коммутацию в пределах изменения тока до номинального значения. При этом секции, замкнутые щетками накоротко, создают продольную н. с., усиливающую основное поле, и наклон характеристики короткого замыкания резко возрастает.

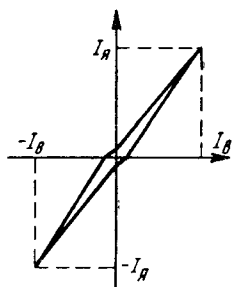


Рис. 2-21. Характеристика короткого замыкания генератора.

Приведенные выше замечания дают возможность судить о том, что *без специальных теоретических знаний и практического опыта при снятии характеристики могут быть допущены большие ошибки.*

2-6. Испытание генераторов под нагрузкой и графическое построение характеристик

В схемах электроприводов генераторы постоянного тока используются для различных целей: как управляемый источник питания в системах Г—Д, в качестве возбудителя, с целью получения стандартного стабильного напряжения 220 в (иногда 110 и 440 в).

При наладке генераторов, служащих источником постоянного напряжения, желательно снять их внешнюю и регулировочную характеристики, экспериментально уточнить величину номинального тока возбуждения и сопротивление реостата возбуждения. Для увеличения жесткости внешней характеристики, т. е. стабилизации напряжения, иногда целесообразно несколько сдвинуть щетки с нейтрали против направления вращения; при этом должна сохраниться безыскровая коммутация щеток. Создать естественную нагрузку для испытания генераторов постоянного напряжения обычно не удастся; приходится нагружать генератор ящиками сопротивлений или водяными реостатами. Крупные генераторы удобно испытывать путем взаимной нагрузки без потребления значительной энергии из сети. Этот метод изложен ниже, так как он является наиболее целесообразным, а нередко единственно возможным для приводов, управляемых по системе Г—Д.

Для опыта взаимной нагрузки собирается схема, приведенная на рис. 2-22,а. Во избежание аварийных перегрузок в цепь якорей генераторов Г1 и Г2 вводятся линейный контактор Л и максимальная защита РМ. С целью плавной регулировки напряжения применяется дополнительный реостат возбуждения R_d малого сопротивления.

Испытуемые генераторы приводятся во вращение синхронными или асинхронными двигателями Д1 и Д2; в последнем случае при необходимости получить точные данные результаты измерений необходимо откорректировать с учетом изменения величины скорости.

Испытание под нагрузкой и снятие характеристик рекомендуется выполнять в следующем порядке.

1. На обоих генераторах устанавливается одинаковое напряжение, равное номинальному напряжению испытуемого генератора Г1 (при испытании крупных машин первые опыты под нагрузкой следует проводить при пониженном напряжении). Включается линейный

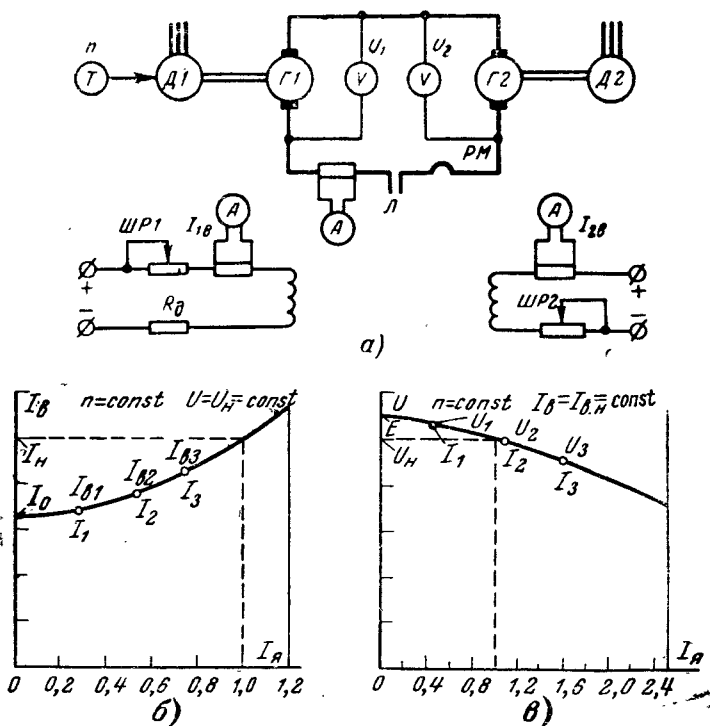


Рис. 2-22. Снятие характеристик генераторов методом взаимной нагрузки.

а — схема испытаний; б — регулировочная характеристика; в — внешняя характеристика.

контактор Л; с помощью регуляторов ШР1, ШР2 и R_0 производится повышение нагрузки генератора Г1 за счет перевода в двигательный режим генератора Г2. Убедившись в безыскровой коммутации щеток обоих генераторов и возможности осуществить плавное повышение тока якоря, можно приступить к снятию характеристик.

2. В первую очередь снимается регулировочная характеристика $I_B = f(I_A)$ при $U = U_H = \text{const}$ (рис. 2-22,б). Несколько точек характеристики $I_{B1}, I_1; I_{B2}, I_2; I_{B3}, I_3 \dots$ снимаются путем постепенного снижения возбуждения $\Gamma 2$ и последующего повышения возбуждения $\Gamma 1$ до значений, при которых поддерживается номинальное напряжение генератора $\Gamma 1$. Опыт проводится в пределах до $(1,1 \div 1,2) I_H$. Во время испытаний уточняется величина номинального тока возбуждения $I_{B.H.}$, при котором нагруженный номинальным током I_H генератор имеет номинальное напряжение U_H .

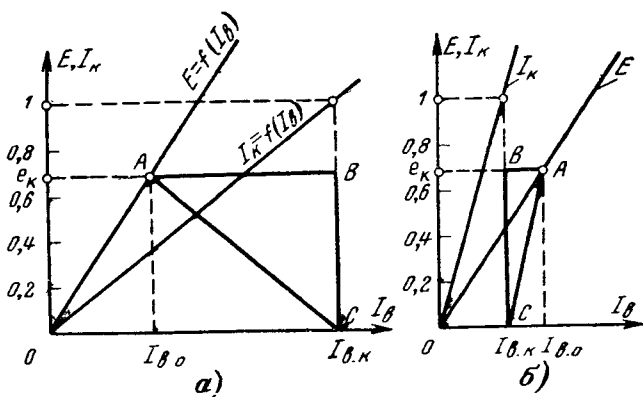


Рис. 2-23. Построение характеристического треугольника.

а — при размагничивающем и б — при подмагничивающем действии реакции якоря.

3. Для снятия внешней характеристики $U = f(I)$ при $I_B = I_{B.H.} = \text{const}$ ток возбуждения генератора $\Gamma 1$ постепенно повышается до номинального значения (рис. 2-22,в). Напряжение на якоре $\Gamma 2$ с помощью регулятора ШР2 уравнивается с напряжением $\Gamma 1$, после чего включается линейный контактор. Ток I_A при этом должен быть равен нулю, а напряжение $U = E$. Подъем напряжения генераторов следует производить осторожно, внимательно наблюдая за работой щеток. При номинальном возбуждении $I_B = I_{B.H.}$ и токе якоря $I = 0$ получается первая точка внешней характеристики. Путем постепенного снижения тока возбуждения генератора $\Gamma 2$ увеличивается ток нагрузки и снимаются несколько точек характеристики $I_1, U_1; I_2, U_2; I_3, U_3 \dots$

Во многих приводах генераторы, управляемые по системе Г—Д, работают с толчками нагрузки, достигающими $(2 \div 2,5) I_H$. У таких генераторов желательно снять внешнюю характеристику в пределах до максимальных рабочих значений тока якоря. При этом опыт необходимо проводить достаточно быстро и осторожно во избежание перегревания якорных цепей и значительных искрообразования на коллекторе.

4. С помощью схемы, приведенной на рис. 2-22,а, можно снять нагрузочную характеристику генератора $U=f(I_B)$ при $I=\text{const}$.

Генераторы, работающие как возбудители, необходимо сначала проверить на безыскровую коммутацию при максимальном рабочем напряжении якоря и минимальном сопротивлении нагрузки. Для возбудителей снимаются характеристика холостого хода и зависимость $U=f(I_B)$ при неизменном сопротивлении в цепи якоря $R=\text{const}$.

Графическое построение внешней и регулировочной характеристик генератора. Графическое построение характеристик производится в тех случаях, когда трудно осуществить испытание генераторов под нагрузкой или желательно сопоставить экспериментальные и расчетные данные.

Для графического построения характеристик в первую очередь необходимо определить стороны основного характеристического треугольника, соответствующего номинальному току генератора. С этой целью в одной системе координат строятся характеристика короткого замыкания и характеристика холостого хода в ее начальной части (рис. 2-23,а). По оси абсцисс откладывается ток возбуждения, а по оси ординат в первом случае — ток короткого замыкания, а во втором — э. д. с.

Построение удобно выполнять в относительных единицах. Для тока якоря $I_K=I_H=1$ по характеристике короткого замыкания находим соответствующий ток возбуждения $I_{B,K}$. Этот ток идет на создание э. д. с. e_K , определяемой падением напряжения в цепи якоря $I_K R_{я}$ и на преодоление размагничивающего действия реакции якоря. Величину $e_K=I_K R_{я}=I_H R_{я}$ находим расчетным путем и откладываем ее (отрезок $\overline{oe_K}$) на оси ординат. Из точки e_K проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с характеристикой холостого хода. Отрезок $e_K A = \overline{OI_{B,0}}$ является составляющей тока возбуж-

Внешняя характеристика $U=f(I)$ при $I_B = \text{const}$ и $n = \text{const}$ строится с помощью характеристики холостого хода (рис. 2-24) и основного характеристиче-

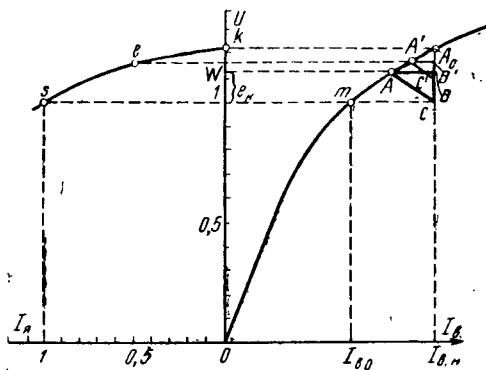


Рис. 2-24. Построение внешней характеристики с помощью характеристического треугольника.

96

сечения с характеристикой холостого хода, определим точку A_0 , соответствующую э. д. с. генератора при $I_B = I_{B.H}$ и отсутствии нагрузки ($I_A = 0$). Точка K является началом внешней характеристики. Уменьшив стороны треугольника ABC до величины 0,75; 0,5 и 0,25 основных размеров и располагая полученные треугольники по вертикали $I_{B.H}A_0$ таким образом, чтобы вершины A всегда лежали на характеристике холостого хода, можно получить еще три точки внешней характеристики. На рис. 2-24 показано нахождение точки e , соответствующей току якоря $I = 0,5 I_H$.

Регулировочная характеристика $I_B = f(I_A)$ при $U = U_H = \text{const}$ и $n = n_H = \text{const}$ строится с помощью характеристики холостого хода и треугольника ABC (рис. 2-25). Все построения выполняем в относительных единицах в одной системе координат. Через ординату $U = 1$ проводим горизонтальную линию; по характеристике холостого хода (точка A_0) находим номинальный ток возбуждения холостого хода I_{B0} , соответствующий началу регулировочной характеристики.

Прибавим к ординате $U = U_H = 1$ величину e_K и проведем через точку W горизонталь до пересечения с характеристикой холостого хода; к вершине A пристраиваем стороны основного характеристического треугольника ABC . На вертикали $B-C$ находим номинальный ток возбуждения $I_{B.H}$. Точка C принадлежит регулировочной характеристике и соответствует номинальному режиму работы генератора. Уменьшив стороны треугольника ABC до величин 0,75; 0,5 и 0,25 основных размеров, с помощью полученных треугольников можно найти остальные нужные точки регулировочной характеристики. На рис. 2-25 для пояснения показано нахождение точки e , соответствующей току якоря $I = 0,5 I_H$.

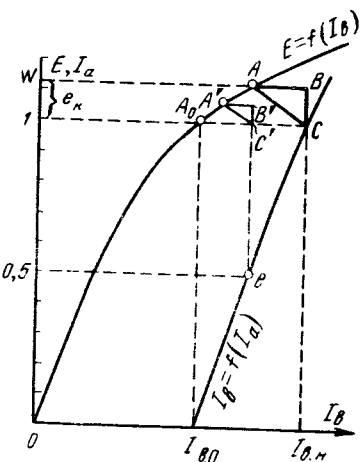


Рис. 2-25. Построение регулировочной характеристики с помощью характеристического треугольника.

2-7. Испытание и снятие характеристик двигателей при различном виде нагрузок

Во время работы двигателей под нагрузкой проверяется коммутация на коллекторе и производятся контрольные измерения токов, напряжений и скорости вращения. Потери в машине могут быть рассчитаны по каталожным и справочным данным [Л. 15 и др.]. У машин мощностью более 100 кВт желательно оценить потери при опытах холостого хода и короткого замыкания. Методика измерения потерь описана в учебниках (например, [Л. 2, 3, 4]). Мощность P_0 , потребляемая двигателем при холостом ходе, складывается из механических потерь $p_{\text{мех}}$, потерь от вихревых токов в стали ротора $p_{\text{ж}}$ и потерь в меди якоря. Механические потери в свою очередь включают потери на трение $p_{\text{тр}}$ (в подшипниках и на коллекторе) и вентиляционные $p_{\text{вент}}$. При холостом ходе ток якоря очень мал, поэтому потерями в меди якоря можно пренебречь. Тогда $p_0 \approx p_{\text{мех}} + p_{\text{ж}} = p_{\text{тр}} + p_{\text{вент}} + p_{\text{ж}}$.

Потери в меди якоря $p_{\text{м}}$ удобнее всего определять при невозбужденном двигателе. Якорь питается от сети

Таблица 2-6

Данные машины постоянного тока и потери	Двигатель глубокого регулирования с принудительной вентиляцией для скорости		Двигатель с принудительной вентиляцией для скорости		Генератор с собственным охлаждением	Двигатель прокатный
	n_1	n_2	n_1	n_2		
Мощность (отдаваемая), кВт	125	125	250	250	2 500	9 600
Скорость, об/мин	300	1 500	500	1 000	1 000	67
Напряжение якоря, в	220	220	440	440	460	800
Сумма потерь Σp , %	11	13	7	7,2	6,2	5,2
Отдача, %	89	87	93	92,8	93,8	94,8
Потери, % к Σp :						
в меди якоря	48	42	39	38	37	30
добавочные	4,8	4,2	6,8	6,4	13,5	7,0
в КО и ДП	28	25	24	23	7,1	31
в коммутаторе ($\Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}}$)	8,2	7	6,6	6,6	5,9	4,0
в стали якоря	6,8	1,8	17	11,5	19,5	15,0
на трение в коммутаторе (щетки по коллектору)	3	12,5	3,1	7,5	27	19,6
на трение цапф и на вентиляцию	1,1	7,5	3,5	7		3,4

через пусковое сопротивление или от отдельного генератора по схеме опыта короткого замыкания (см. рис. 2-20). Для правильной оценки падения напряжения на щетках $\Delta U_{\text{щ}}$ желательно медленно, на ползучей скорости проворачивать якорь. По напряжению на якорных цепях $U_{\text{к.з}}$ (включая ошиновку и токовые аппараты) и току $I_{\text{к.з}}$ определяется полное сопротивление $R_{\text{я}} = U_{\text{к.з}}/I_{\text{к.з}}$.

В табл. 2-6 для иллюстрации приведены потери некоторых машин постоянного тока.

Полезная мощность на валу двигателя P рассчитывается по мощности, потребляемой из сети, P_c и потерям Σp . Потери в двигателе складываются из потерь холостого хода и потерь в меди p_m , созданных током нагрузки

$$p = p_c - \Sigma p = p_c - p_0 - p_m = U_c I_{\text{я}} - p_0 - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}. \quad (2-3)$$

Момент на валу двигателя M рассчитывается по известной зависимости

$$M = 975 \frac{P}{n}, \quad (2-4)$$

где M — момент, $\text{кг} \cdot \text{м}$; P — мощность, квт ; n — скорость вращения, об/мин .

Ниже рассматривается методика снятия характеристик двигателей некоторых распространенных электроприводов.

1. Электроприводы механизмов и машин, передвигаемых в горизонтальной плоскости, имеют момент нагрузки, зависящий в основном от трения. Момент трения механизмов на колесах (тележек и мостов кранов, слитковозов, электрокар), а также механизмов скольжения (суппортов станков, толкателей) мало зависит от скорости, но может иметь большую величину при трогании с места. Во время испытания подоб-

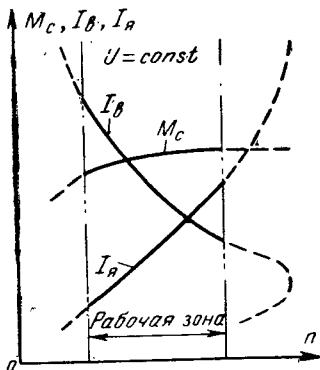


Рис. 2-26. Характеристики электропривода механизма передвижения.

ных электроприводов желательно получить характеристику момента сопротивления (момента трения M_T , рис. 2-26) при разном состоянии смазки

$$M_T = 975 \frac{U_{\text{я}} I_{\text{я}} - \Sigma p}{n} = f''(n) \approx \text{const.} \quad (2-5)$$

При неизменном напряжении якоря ($U_{\text{я}} = U_{\text{с}} = \text{const}$) и регулировке в цепи возбуждения снимаются характеристики $I'_{\text{я}} = f(n)$ и $I_{\text{в}} = f(n)$; в системах с регулировкой напряжения якоря (при $I_{\text{в}} = \text{const}$) снимаются характеристики $I''_{\text{я}} = f(n)$.

2. Электроприводы подъемных механизмов, прокатных клетей, металлообрабатывающих станков и различных

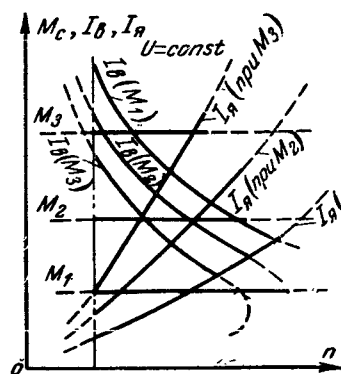


Рис. 2-27. Характеристики электроприводов с постоянными статическими моментами, определяемыми заданной технологической нагрузкой.

иных агрегатов имеют неизменные статические моменты, определяемые заданной технологической нагрузкой. Примерные рабочие характеристики такого привода даны на рис. 2-27. Разным скоростям соответствует обычно разный максимально допустимый ток якоря. Его величина зависит от многих факторов, например: чем выше скорость, тем лучше охлаждение двигателя (при отсутствии принудительной вентиляции) и, следовательно, можно допустить выделение большого количества теп-

ла ($p_{\text{м}} = I_{\text{я}}^2 R$) в меди якоря. Однако при больших скоростях сильнее проявляется реакция якоря, ухудшается коммутация щеток, а иногда возникают перегревы отдельных частей вследствие механических и электрических потерь. Учесть все эти факторы наладчик может только при тщательном испытании двигателя; в первую очередь он должен ориентироваться на те предельные значения тока $I_{\text{макс}} = f(n)$, которые дает завод-изготовитель.

3. Момент сопротивления вентилятора резко возрастает с увеличением скорости вращения (рис. 2-28,а).

У регулируемых вентиляторов с приводными двигателями постоянного тока во время наладки необходимо оценить максимально возможные рабочие скорости. При открытых задвижках лимитировать может номинальный ток якоря или допустимая скорость двигателя; необходимо также проверить, не возникают ли опасные вибрации привода на больших скоростях. По результатам испытаний выбираются сопротивление реостата возбуж-

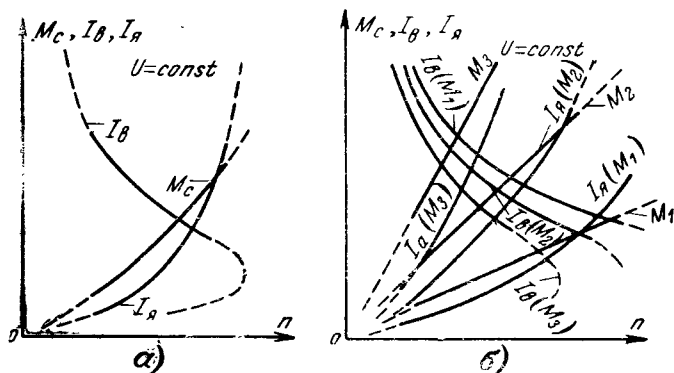


Рис. 2-28. Характеристики электроприводов со статическим моментом, зависящим от величины скорости.

а — привод с вентиляторным моментом; б — привод с моментом прямо пропорциональным скорости.

дения и уставка максимальной защиты. В данном случае максимальную защиту рекомендуется настраивать на величину 1,1—1,15 пускового тока якоря $I_{п}$, соответствующего скорости, принятой за максимально допустимую по всем основным показателям (при $n_{\max}$).

Электроприводы насосов и ряда компрессоров имеют момент нагрузки, изменяющийся прямо пропорционально скорости $M=kn$; наклон характеристики моментов зависит от положения клапанов или задвижек (рис. 2-28,б). Двигатели насосов несколько менее чувствительны к изменению скорости, чем двигатели вентиляторов, но для них также должен быть строго ограничен верхний предел скорости. Максимальную защиту таких приводов обычно настраивают на $(1,2 \div 1,3)I_{п}$ (при $n_{\max}$).

Электроприводы многих механизмов работают в кратковременном или повторно-кратковременном режиме. Весьма часто привод даже не разгоняется до установившейся скорости и снять характеристики двига-

теля с помощью обычных стрелочных приборов не представляется возможным. При испытании двигателей таких приводов под нагрузкой в первую очередь проверяются коммутация щеток и величины толчков тока в переходных режимах, т. е. выполняются такие же операции, как при пробных пусках.

Основными показателями работы таких приводов являются время разгона и торможения, а иногда также время реверса.

Для оценки переходных процессов рекомендуется использовать электронный осциллограф с послесвечением; при необходимости проведения контрольных расчетов следует применять светолучевые осциллографы. Осциллограммы переходных процессов имеют существенное значение не только для наладки данного привода в рассматриваемых условиях, но позволяют оценить возможность интенсификации работы агрегата в целом и найти рациональные решения при проектировании аналогичных установок.

Добиваясь получения благоприятных переходных режимов, наладчик всегда должен иметь в виду тепловое состояние отдельных частей двигателя. У некоторых приводов необходимо проверить, допускает ли обмотка возбуждения длительное включение на полное рабочее напряжение.

Выбирая двигатели по среднеквадратичным величинам тока или мощности, иногда не учитывают ухудшение охлаждения в периоды пауз и работы с низкими скоростями. У приводов кратковременных включений допускаются значительные перегрузки двигателей. При этом исходят из того, что нагрев происходит медленно и температура обмоток не превысит нормируемых значений.

Во время наладки необходимо проверить, не превышает ли длительность включения принятых в расчетах величин (см. § 1-2); в случае затяжных включений при относительно низкой температуре корпуса возможен недопустимый перегрев якорных цепей двигателя.

Приведенные замечания показывают, как разнообразны могут оказаться причины перегрузки двигателей; от наладчика всегда требуется внимательное, вдумчивое отношение к режиму работы привода и умение определить, не превышает ли температура деталей машины допустимые величины.

Глава третья

МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3-1. Наладочные работы, выполняемые при неподвижном состоянии машины

Наладка машин переменного тока проводится по программе, приведенной в § 1-1. Работы общего характера, как, например, проверка изоляции, измерение сопротивлений и ряд других, мало отличаются от подобных работ по машинам постоянного тока, освещены в литературе [Л. 3, 7, 9, 18] и не требуют специальных пояснений. В данной главе описаны проверка схем соединений, контрольные измерения при неподвижной машине и снятие основных характеристик, даны также некоторые предложения по контролю изоляции с учетом температуры обмоток и рекомендации по внешнему осмотру машин.

Данные измерений сопротивления изоляции и с помощью мегомметра, как показано в § 1-6, являются основным показателем для определения возможности включения машины. Поскольку нет четких указаний относительно того, при каких температурах следует измерять и оценивать изоляцию, ниже сделана попытка дать соответствующие рекомендации. Приведенные величины, основаны на обобщении опыта наладки и эксплуатации.

Асинхронные двигатели с номинальным напряжением до 500 в могут быть включены (кратковременно) при следующих минимальных показаниях мегомметра:

P , квт	$\leq 0,3$	0,3—2	2—20	40—200		
τ , °C	20	20	20	20	40	60
R , ком	100	10	50	400	100	10

Здесь τ — минимальная температура, при которой должно оцениваться сопротивление изоляции.

При низких показателях сопротивление изоляции обмоток должно контролироваться после каждого кратковременного включения двигателя. В случае дальнейшего

снижения сопротивления изоляции (не связанного с нагревом) повторные включения необходимо прекратить и осуществить сушку машины.

Минимальный норматив 10 ком указан для машин мощностью 0,3—2 квт. Этот норматив, взятый из практики, является очень низким, и включать двигатели при таком сопротивлении изоляции допустимо только в тех случаях, когда из-за них задерживается пуск ответственных агрегатов. Включение рекомендуется производить на 5—20 сек, а затем на 2—5 мин с последующей проверкой изоляции. Подобные включения (если это допускает механизм) желательно повторить несколько раз. Изоляция должна улучшиться вследствие вентиляции и частичного прогрева током.

Машины очень малых мощностей (меньше или равных 0,3 квт) имеют обычно относительно слабую изоляцию, чувствительную к токам утечки; кроме того, такие машины легко высушиваются с помощью рефлекторов (мощностью 60 вт) или вентиляторов (до 50 вт). По указанной причине для микромашин нижний норматив составляет 100 ком.

Для машин мощностью 40—200 квт даны три контрольные температуры 20, 40, 60°С. Наиболее показательными являются измерения при повышенных температурах 60°С и более. Поэтому машины ответственных и малодоступных механизмов (например, крановых приводов) желательно специально нагревать воздуходувками до 60°С и испытывать при таких температурах. Вместе с тем опыт показывает, что двигатели напряжением 380 в мощностью до 200 квт могут испытываться и при меньших температурах 40 и 20°С, для которых даны соответствующие нормативы сопротивления изоляции.

Аппаратура и приспособления для испытаний и снятия характеристики. В § 1-4 приведен список специальной аппаратуры, рекомендуемой для наладочных работ.

Большинство измерений по машинам переменного тока может быть выполнено с погрешностью от $\pm 1,5$ до $\pm 2,5\%$, причем измеряемые величины весьма различны, например от милливольт до сотен вольт. Поэтому рекомендуется пользоваться многопредельными детекторными приборами малого потребления. Большие токи измеряются с помощью обычных трансформаторов тока; допустимо применение малоомных добавок, на которых

падает 0,5—3 в или стандартных шунтов на 45, 75, 150 мв. Особое место занимают измерения напряжений и токов при пониженных частотах скольжения. Для этих целей могут быть использованы регистрирующие приборы или катодные и шлейфовые осциллографы (вопросы измерений подробнее рассмотрены в § 5-4).

Техническая документация. У асинхронных двигателей характеристики снимаются только в редких случаях, когда двигатели используются для привода генераторов постоянного тока. Поэтому в отчетной документации по наладочным работам дополнительно к материалам, указанным в § 1-4, рекомендуется приводить типовые характеристики машин. Характеристики заимствуются из каталогов или из справочников (например, [Л. 15]). На осях координат типовых характеристик следует отметить величины токов и мощности, измеренные во время наладки. Тогда, сопоставляя каталожные характеристики и данные измерений, можно оценить величину статического момента нагрузки, запас пускового момента, вероятные величины ускорений и иные показатели, весьма существенные для анализа работы электропривода.

Внешний осмотр. При осмотре машин переменного тока, наряду с указанным в гл. 1, следует проверить чистоту камер и отсеков корпуса статора. В машинах высокого напряжения с особой тщательностью должны быть осмотрены лобовые соединения обмотки статора, распорки и веревочные бандажы на них; необходимо проверить, не касаются ли обмотки каких-либо металлических деталей крышек, станины, термометров и пр.

У машины с фазным ротором проверяются состояние колец, щеток и действие механизма, замыкающего кольца накоротко. Усилие при подъеме щеток должно быть небольшим, крайние положения должны четко фиксироваться; контакты и замыкающие кольца должны быть смазаны тонким слоем вазелина. Необходимо убедиться в том, что при наибольшем разбеге вала (в момент пуска) между изоляционными перегородками, разделяющими кольца, и щетками остается достаточное расстояние.

При осмотре машин, прошедших капитальный ремонт, следует проверить состояние шихтовки ротора и статора, стяжку пакетов, крепление вентилятора и дру-

гих деталей. Желательно проверить равномерность воздушного зазора. В открытых синхронных машинах следует проверить воздушный зазор под каждым полюсом. В асинхронных машинах воздушный зазор очень мал, и при значительном срабатывании подшипников скольжения или посадочных мест щитов создается опасность задевания ротора за статор. Величины зазоров в диаметрально противоположных точках не должны отличаться друг от друга более чем на 10% среднего значения зазора.

У закрытых машин величины воздушных зазоров могут быть измерены только при наличии специальных отверстий в их щитах. К сожалению, у большинства закрытых машин подобные отверстия не предусматриваются. Во время планово-предупредительных ремонтов для оценки смещения роторов в щитах отдельных, выборочно взятых машин рекомендуется засверливать по четыре отверстия. Отверстия располагаются равномерно против рабочих зазоров, по величине рассчитываются на свободный проход щупа и в обычном состоянии должны быть закрыты пробками или накладками.

В настоящее время на специализированных предприятиях по ремонту электрических машин и в электроцехах крупных заводов освоена технология капитальных ремонтов асинхронных двигателей. У машин заменяется обмотка, обеспечивается плотность шихтованных пакетов; на шейки валов наваривается новый металл, а затем производится проточка или шлифовка роторов в сборе. Гальваническим путем или иными современными методами восстанавливаются посадочные поверхности в щитах машин, заменяются подшипники (иногда устанавливаются подшипники более высокого класса). По износоустойчивости отремонтированные двигатели часто не уступают новым машинам. Однако стоимость капитальных ремонтных работ имеет такой же порядок, как и стоимость новых двигателей, которые могут быть более современны и иметь лучшие характеристики. В этой связи наладчики должны проводить систематическую работу по оценке морального старения конструкций машин и схем электроприводов, согласовывая свои рекомендации с электроремонтной службой завода.

Проверка схемы соединения обмоток. Статоры большинства двигателей переменного тока имеют шесть выводов, соответствующих началам и концам

фазных обмоток. Предписанные стандартом обозначения выводов приводятся в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Фаза	Обмотка статора, ГОСТ 183-66	
	Начало	Конец
I	C1	C4
II	C2	C5
III	C3	C6

Обычно выводы всех фаз статорной обмотки присоединяются к зажимам, как указано на рис. 3-1,а. Приведенная конструкция дает возможность получить соединение в звезду при горизонтальном расположении перемычек (рис. 3-1,б) и соединение в треугольник при их вертикальном расположении (рис. 3-1,в).

В некоторых машинах обмотки статора соединены в звезду наглухо и на доску зажимов выведено только четыре вывода: фазы C1, C2, C3 и нулевая точка 0. Выводы фазного ротора обозначаются буквами P1, P2, P3.

У асинхронных двигателей с переключаемым числом полюсов выводы секционированных обмоток обозначаются дополнительными цифрами впереди прописных букв; цифра указывает число полюсов машины при данном соединении. Примерные обозначения указаны в табл. 3-2.

В случае отсутствия маркировки концов обмоток взаимная их согласованность проверяется индуктивным методом на постоянном или переменном токе. У крупных машин согласованность обмоток рекомендуется проверять даже при наличии заводской маркировки. Предварительно определяется полярность концов и находятся парные выводы каждой фазы.

Метод проверки напряжением постоянного тока.

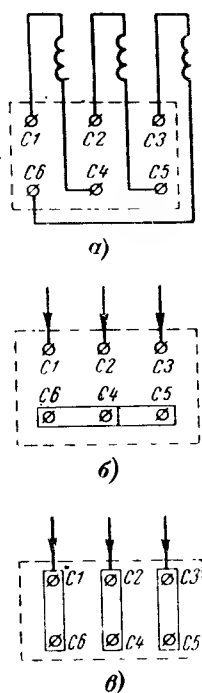


Рис. 3-1. Выводы обмоток машин переменного тока.

1. Маркировку выводов проще всего проверить или определить с помощью аккумулятора (или сухого элемента) и вольтметра. Батарея включается импульсом на одну из фаз, как указано на рис. 3-2, а, к другим фазам поочередно подсоединяется вольтметр. Путем присоединения выводов подбирается такое включение вольт-

Таблица 3-2

Секционированные обмотки		Двухскоростные двигатели	
Первая обмотка	Вторая обмотка	Для четырех полюсов	Для восьми полюсов
1C1	2C1	4C1	8C1
1C2	2C2	4C2	8C2
1C3	2C3	4C3	8C3
1C4	2C4	4C4	8C4
1C5	2C5	4C5	8C5
1C6	2C6	4C6	8C6

метра, при котором в момент подачи напряжения от батареи стрелка прибора дает отклонение вправо. В этом положении против «плюса» батареи и «минуса» вольт-

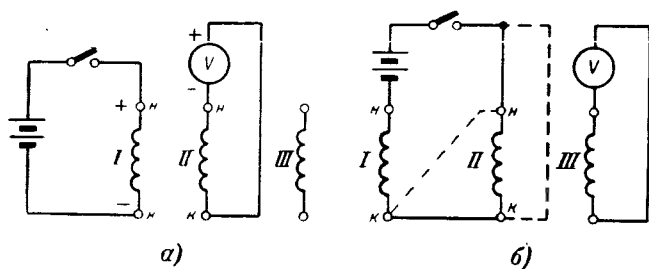


Рис. 3-2. Проверка маркировки выводов статора с помощью источника постоянного тока.

а — при раздельном включении обмоток; б — то же, но при парном включении.

метра находятся начала фазных обмоток. Для контроля следует перенести батарею на другую фазу и повторить опыт.

2. Дополнительная проверка маркировки выводов в спорных или ответственных случаях может быть произведена также с помощью батареи и вольтметра, но

при попарном включении фаз (рис. 3-2,б). Две фазы соединяются последовательно (попарно) между собой и импульсами включаются на батарею. К третьей фазе подсоединяется вольтметр. Если первые две фазы соединены одноименными зажимами (как указано на рис. 3-2,б сплошными линиями), вольтметр не будет реагировать на включение батареи. При соединении фаз разноименными зажимами (пунктирные линии) в моменты включения и отключения батареи стрелка вольтметра будет давать отклонения.

Метод проверки напряжением переменного тока. Две произвольные фазы статора соединяются последовательно и включаются на пониженное напряжение сети переменного тока (рис. 3-3). При отсутствии пониженного напряжения можно последовательно с обмотками включить реостат или лампу. На третью свободную фазу подключается вольтметр переменного тока или лампа. Если первые две фазы соединены одноименными выводами (как указано на рис. 3-3 сплошными линиями), то вольтметр (или лампа) покажет отсутствие напряжения на третьей фазе. При соединении двух фаз разноименными зажимами (пунктирные линии) вольтметр или лампа покажет наличие напряжения. Аналогично определению взаимного соответствия выводов первых двух фаз маркируются выводы третьей фазы.

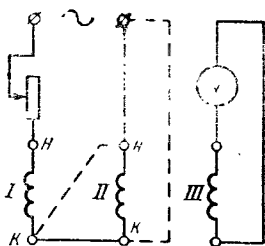


Рис. 3-3. Проверка маркировки выводов статора с помощью источника переменного тока.

Определение числа полюсов обмотки статора. В отдельных случаях, например при отсутствии заводской таблички, требуется определить, какой синхронной скорости соответствует схема обмотки статора. Задача эта решается с помощью гальванометра постоянного тока, подключаемого на выводы статора (гальванометр может подсоединяться на выводы одной или двух фаз). Если проворачивать ротор машины от руки, то под действием его остаточного магнетизма в обмотке статора возникнет э. д. с., вызывающая периодическое отклонение стрелки гальванометра. Число отклонений стрелки в каждую сторону будет равно числу

полюсов ротора одной полярности, прошедших мимо данной фазы статора.

Во избежание ошибки рекомендуется выполнить 10 оборотов вала ($N=10$) и посчитать соответствующее число отклонений стрелки прибора в одну сторону. Если, например, число отклонений K окажется равно 30 (или 31), то машина имеет три пары полюсов

$$p = \frac{K}{N} = \frac{30(31)}{10} = 3;$$

при этом синхронная скорость вращения

$$n_c = \frac{60f}{p} = \frac{3\,000}{3} = 1\,000 \text{ об/мин (при } f = 50 \text{ гц)}.$$

Определение направления вращения. Для получения правильного направления вращения двигателя необходимо согласовать фазировку питающего кабеля с маркировкой выводов статора. При правильном чередовании фаз и их раскраске фазу *I* (желтую) сети следует подключить к выводу статора *C1*, фазу *II* (зеленую) — к *C2* и фазу *III* (красную) — к *C3*. Раскраска фаз может быть неправильной, поэтому чередование фаз необходимо проверить с помощью фазоуказателя (например, типа ФУ-2), а при его отсутствии — путем пробного включения небольшого асинхронного двигателя, имеющего проверенную маркировку выводов статора. При проверке фазировки сети высокого напряжения фазоуказатель включается через трехфазный трансформатор напряжения.

В случае отсутствия стандартной маркировки выводов статора или сомнения в ее правильности требуемое направление вращения может быть найдено одним из следующих способов.

Двигатели с напряжением статора 6—10 кВ подключаются к сети 380 в. Ток статора, составляющий в этих случаях 1:15 или 1:25 от обычного значения пускового тока (при прямом включении на номинальное напряжение), как правило, недостаточен для трогания ротора с места. Ротору надо «помочь» тронуться с места (например, с помощью троса, навиваемого на шкив). При этом необходимо соблюдать большую осторожность, так как после троганья с места в правильном направлении ротор может начать вращаться. Облегчение хода

и резкое торможение показывают, совпадают или разнятся направления вращения поля статора и ротора. Определив с помощью фазоуказателя чередование фаз подведенного напряжения 380 в, в последующем (с помощью трансформаторов напряжения) можно подобрать такое же чередование фаз питающей сети высокого напряжения.

Для двигателей высокого напряжения (асинхронных с фазным ротором и синхронных) опыт проводится путем подачи постоянного тока в обмотку ротора и поворота ротора в требуемом направлении. При испытании ток ротора может составлять 5—10% номинального; к статору подключается указатель чередования фаз. Во время толчка ротора фазоуказатель получает напряжение, достаточное для трогания его диска с места. Отметив выводы статора по маркировке фазоуказателя, следует этим же прибором, но через трансформаторы напряжения проверить чередование фаз питающего кабеля, после чего подключить кабель к соответствующим по маркировке выводам статора.

Данный метод может быть применен и к двигателям низкого напряжения, но в этом случае фазоуказатель с целью увеличения напряжения на зажимах следует подключить к выводам статора через два небольших трансформатора 220/12 в согласно схеме, данной на рис. 3-4.

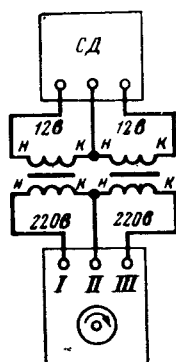


Рис. 3-4. Схема включения фазоуказателя через понижающие трансформаторы.

3-2. Измерения перед пуском машины

Рабочие и пусковые характеристики асинхронных машин можно построить и проверить с помощью данных, получаемых во время опытов короткого замыкания (при неподвижном роторе) и холостого хода. Для уяснения методики испытаний напомним основные соотношения электрических и электромагнитных величин.

А. Уравнение э. д. с.

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1; \quad Z_1 = r_1 + jx_1; \quad z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}, \quad (3-1)$$

где U_1 — приложенное к статору напряжение (линейное или фазное); E_1 — э. д. с., индуцируемая в обмотке статора; I_1 — ток фазы статора; z_1 — полное сопротивление (линейное или фазное в зависимости от того, как выбраны величины U_1 и E_1); r_1 , x_1 — активное и индуктивное (реактивное) сопротивления статора.

Вторичное напряжение U_2 у короткозамкнутых асинхронных двигателей равно нулю ($U_2=0$); э. д. с. обмотки ротора E_2 полностью гасится в его сопротивлении $E_2=I_2 z_2$. Величина полного сопротивления зависит от скольжения s и рассчитывается по формуле

$$z_2 = r_2 + \frac{r_2(1-s)}{s} + jx_2. \quad (3-2)$$

Скольжение s определяется относительным снижением скорости ротора n по сравнению со скоростью вращения поля или с синхронной скоростью n_c

$$s = \frac{n_c - n}{n_c}; \quad n_c = \frac{f_1}{p}, \quad (3-3)$$

здесь p — число пар полюсов; f_1 — частота сети.

Электродвижущая сила E_2 и сопротивление x_2 изменяются пропорционально скорости; составляющая активного сопротивления $r_2(1-s)/s$ пропорциональна механической мощности на валу двигателя.

Соотношение величин удобно представить с помощью схемы замещения (рис. 3-5). Согласно схеме подведенное к статору напряжение сети U_c вызывает протекание тока I_1 ; он содержит намагничивающую составляющую I_0 , не зависящую от скорости и определяемую сопротивлением z_1 , и приведенный вторичный ток I'_2 . Эту зависимость трактуют иногда как закон полной н. с.

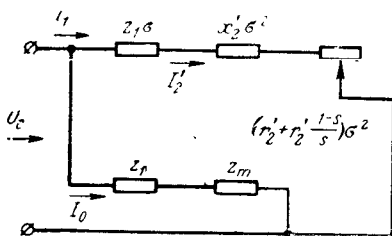


Рис. 3-5. Схема замещения трехфазного асинхронного двигателя.

$$I_0 = I_1 + I_2. \quad (3-4)$$

В цепи тока I'_2 приведенное реактивное сопротивление и полное активное сопротивление $r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s}$ пропорциональны квадрату коэффициента трансформации обмоток k .

Б. Вращающий момент асинхронного двигателя [Л. 5, 8].

$$M = \frac{m_1 p U_{1\phi}^2 \frac{r_2^2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \sigma_1 \frac{r_2'}{s} \right) + (x_1 + \sigma_1 x_2') \right]}, \quad (3-5)$$

или

$$M = \frac{1}{\sqrt{2}} (m_1 w_1 k_{061} I_2' \cos \psi_2) (p \Phi_m), \quad (3-6)$$

где m_1 — число фаз; $U_{1\phi}$ — первичное напряжение фазы;

$$\sigma_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m},$$

σ_1 — поправка на параметры Г-образной схемы; w_1, k_{061} — число витков первичной обмотки и обмоточный коэффициент; ψ_2 — угол сдвига между векторами $\vec{E}_2$ и $\vec{I}_2$; Φ_m — амплитуда магнитного потока.

Максимальный вращающий момент

$$M_m = \frac{1}{2\sigma_1} \frac{m_1 p U_{1\phi}^2}{2\pi f_1 [r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + \sigma_1 x_2')^2}]}. \quad (3-7)$$

Соответствующее скольжение

$$s_m \approx \frac{\sigma_1 r_2'}{x_1 + \sigma_1 x_2'}. \quad (3-8)$$

Сведя все постоянные величины к общему коэффициенту K и приняв для упрощения $\sigma_1 = 1$, получим:

$$M_m \approx K \frac{U_{1\phi}^2}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}; \quad (3-9)$$

$$s_m \approx \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}.$$

Испытанию в режиме короткого замыкания рекомендуется подвергнуть все двигатели высоко-го напряжения и низковольтные регулируемые двигатели с короткозамкнутым и фазным ротором. Оно заключается в проверке величины токов во всех фазах статора при подаче пониженного напряжения на заторможенную машину для получения исходных данных по настройке защиты, а также для возможности сравнения с последующими контрольными измерениями, выполняемыми в процессе эксплуатации. Кроме того, при

этом испытании определяются направление вращения двигателя, фазировка кабеля, исправность главных цепей.

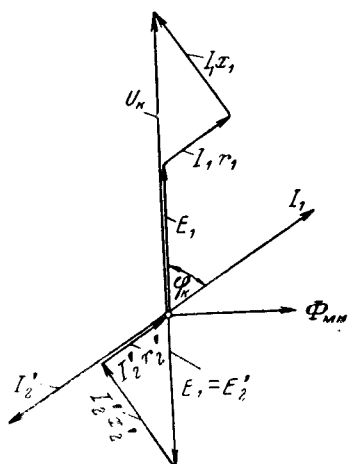
Соотношение э. д. с. и токов при данном режиме удобно представить в виде векторной диаграммы (рис. 3-6). Из диаграммы видно, как подведенное к двигателю напряжение распределяется в его обмотках. Общее приведенное сопротивление машины определяется так же, как сопротивление первичной обмотки z_1 по формуле (3-1)

$$z = \frac{U_k}{I_k} = \sqrt{r^2 + x^2}.$$

Если двигатель имеет фазный ротор, то после измерения активного сопротивления обмоток индуктивные составляющие определяются расчетным путем $x = \sqrt{z^2 - r^2}$.

Параметры вторичной обмотки (обмотки ротора) приводятся к первичной по известным соотношениям

Рис. 3-6. Векторная диаграмма асинхронного двигателя при неподвижном роторе (опыт короткого замыкания).



$$U'_2 = kU_2; I'_2 = \frac{I_2}{k}; r'_2 = k^2 r_2; x'_2 = k^2 x_2, \quad (3-10)$$

где k — коэффициент трансформации, равный примерно отношению чисел витков обмоток статора и ротора.

Составляющие полного сопротивления машины могут быть определены расчетным путем по результатам измерений напряжения, тока и активной мощности во время опыта короткого замыкания.

$$P_k = U_k I_k \sqrt{3} \cos \varphi = 3 I_k^2 r'_\phi, \quad (3-11)$$

откуда

$$r'_\phi = \frac{P_k}{3 I_k^2}; \quad x'_\phi = \sqrt{(z'_\phi)^2 - (r'_\phi)^2}. \quad (3-12)$$

Параметры короткого замыкания r_k , x_k и z_k остаются почти неизменными при разных U_k (а следовательно,

и I_K) у всех машин с открытыми пазами статора и ротора.

Примерные характеристики короткого замыкания такого двигателя даны на рис. 3-7 (сплошные линии). У двигателей малой мощности с закрытыми пазами ротора при увеличении тока I_K сначала насыщаются перемины пазов, а затем зубцы, что приводит к значительному уменьшению индуктивного сопротивления x_K . Поскольку величины x_K и z_K изменяются с увеличением тока I_K (пунктирные линии), характеристики короткого замыкания желательно снимать до значений $I_K = (2,5 \div 3) I_N$.

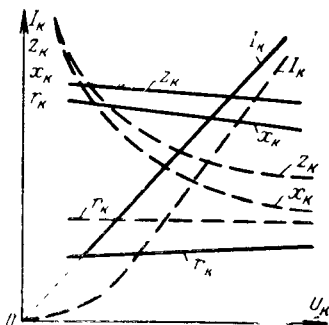


Рис. 3-7. Характеристики короткого замыкания асинхронного двигателя.

Благоприятные условия для снятия характеристик короткого замыкания имеют место при наладке регулируемых низковольтных асинхронных двигателей, питаемых от преобразователей частоты. Синхронные генераторы являются удобным источником пониженного напряжения. При испытании следует, однако, строго (до $\pm 2\%$) поддерживать номинальную частоту, определяемую скоростью генератора. Пониженное напряжение порядка 12—36 в легко получить от трех «котельных» трансформаторов, собираемых по схеме $Y-Y$ или $Y-\Delta$. Напряжения, соответствующие $I_K = (2,5 \div 3) I_N$, можно получить от сварочных трансформаторов. Статические ионные и магнитные регуляторы напряжения заметно изменяют форму э. д. с., и их использование при испытаниях требует определенного опыта (см. § 5-4).

Режим короткого замыкания у высоковольтных двигателей (6—10 кВ) удобно получить путем их включения на напряжение сети 380 в; при этом ток статора обычно в 2—3 раза меньше номинального значения.

Полученные при измерениях токи всех фаз должны отличаться не более чем на 5%. По величине напряжения и тока рассчитывается, а затем сверяется с каталожным значением пусковой ток I_n машины

$$I_n = I_{K.3} \frac{U_n}{U_{K.3}},$$

где $I_{к.з.}$, $U_{к.з.}$ — ток и напряжение при испытании в режиме короткого замыкания; $U_{п}$ — напряжение, подаваемое на статор во время пуска.

Пример. Пусть $U_{п}=6\,000$ в; $I_{п}=190$ а; $U_{к.з.}=380$ в; $I_{к.з.}=80$ а.

а) При пуске через автотрансформатор и подаче на статор 40% номинального напряжения

$$I_{п} = 80 \cdot \frac{0,4 \cdot 6\,000}{380} \approx 500 \text{ а},$$

б) При прямом пуске, когда $U_{п} = U_{н}$.

$$I_{п} = 80 \cdot \frac{6\,000}{380} = 1\,260 \text{ а}.$$

Кратность пускового тока приводится в каталогах.

Для данного примера $I_{п}/I_{н}=6,6$.

Активная мощность во время опыта короткого замыкания может измеряться с помощью обычных трехфазных и однофазных ваттметров (см. § 1-4).

Асинхронные двигатели с фазным ротором. Перед пуском машин мощностью более 40 квт рекомендуется определить коэффициент трансформации обмоток статора и ротора, что дает уверенность в исправности обмоток, и снять характеристику короткого замыкания.

Для проверки коэффициента трансформации под щетки ротора кладут прокладки из электрокартона и на статор подают напряжение; двигатели высокого напряжения рекомендуется включать на напряжение 380 в.

Измеряются напряжения между всеми фазами статора и ротора, а затем их значения сравниваются между собой.

Электродвижущая сила на разомкнутом роторе обычно на 3—5% ниже, чем величина, получаемая из соотношения числа витков обмоток. Понижение э. д. с. против расчетной величины происходит из-за падения напряжения в обмотке статора и наличия потоков рассеяния.

Пример. При напряжении 380 в на зажимах обмотки статора напряжение на разомкнутом роторе по замерам равнялось 150 в.

Статор и ротор соединены в звезду; число витков на фазу статора — 300, ротора — 124.

По отношению чисел витков коэффициент трансформации

$$k_s = \frac{300}{124} = 2,42;$$

по замерам

$$k_a = \frac{380}{150} = 2,53;$$

погрешность

$$\Delta k = \left(\frac{k_a}{k_b} - 1 \right) 100 = \left(\frac{2,53}{2,42} - 1 \right) 100 = 4,5\%.$$

Полученное соотношение коэффициентов трансформации можно считать правильным.

Относительное расхождение напряжений между фазами ротора может составлять 2—3% и более.

Синхронные двигатели высокого напряжения перед пуском рекомендуется проверить путем подведения к статору пониженного напряжения (не выше 10—15% номинального); при этом определяются кратность пускового тока и величина напряжения на неподвижном роторе. Выводы заторможенного ротора подключаются к пусковому разрядному сопротивлению или возбудителю, как предусматривается схемой управления.

Измеряются напряжения на статоре U'_c , токи I'_c во всех его фазах и напряжения на выводах ротора U_p .

По результатам измерений при пониженном напряжении U'_c рассчитываются пусковой ток I_n и напряжение U_p на разрядном сопротивлении R_p (если ротор не замкнут накоротко), соответствующие условиям нормального пуска. В дальнейшем эти данные используются при настройке аппаратуры защиты и режима разгона.

Пусковой ток и напряжение на роторе примерно пропорциональны подводимому к статору напряжению, и пересчет ведется по линейной зависимости

$$I_n = \frac{U_n}{U'_c} I'_c; \quad U_p = \frac{U_n}{U'_c} U'_p,$$

где U_n — напряжение, подаваемое на статор в момент включения. При прямом пуске $U_n = U_n$.

3-3. Пуск и снятие характеристик асинхронных двигателей

Пуск асинхронного двигателя выполняется с соблюдением всех мероприятий, описанных в гл. 1.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором напряжением 220/380 и 500 в при включении под напряжение контролируются только по величине тока холостого хода и скорости вращения. Измерения следует производить после обкатки подшипников. Полученный при

измерениях и приведенный к номинальному напряжению ток холостого хода не должен отличаться от каталожного более чем на $\pm 10\%$.

Во время пересчетов следует пользоваться заводскими характеристиками; в случае их отсутствия можно ориентироваться на справочные данные [Л. 15].

При наладке асинхронных двигателей, питаемых от синхронных генераторов или статических преобразова-

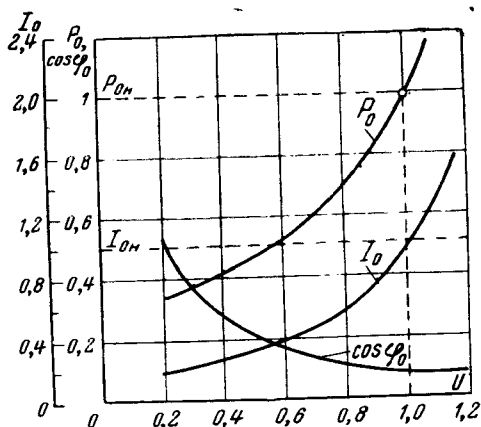


Рис. 3-8. Характеристики холостого хода асинхронного двигателя.

телей частоты, желательно снять зависимость тока холостого хода I_0 и соответствующей мощности P_0 от напряжения источника питания. В группе однородных двигателей (например, двигателей роликов рольганга) подобные характеристики (при разных рабочих частотах) достаточно снять только у двух-трех машин. Примерные зависимости I_0 , P_0 , $\cos \varphi_0 = f(U_c)$ даны на рис. 3-8.

По данным опытов холостого хода и короткого замыкания легко построить круговую диаграмму асинхронного двигателя, дающую наглядное представление о соотношении основных его параметров (рис. 3-9). В последующем диаграмма может быть использована для оценки режимов работы электропривода.

Зависимость электромагнитного момента и тока статора асинхронного двигателя единой серии с короткозамкнутым ротором (типа А) от скорости вращения представлена на рис. 3-10 (кривые $M_{к.з.}$, $I_{к.з.}$). У таких

двигателей пусковой ток $I_{\text{п}}$ превышает номинальный ток в 4,5—7 раз; пусковой момент $M_{\text{п}} = 1,1 \div 1,5 M_{\text{н}}$, максимальный $M_{\text{макс}} = 2 \div 3 M_{\text{н}}$.

Вследствие того что вращающий момент двигателя по мере нарастания скорости примерно до 80% синхронной непрерывно увеличивается, разгон происходит с возрастающим ускорением; в то же время ток стано-

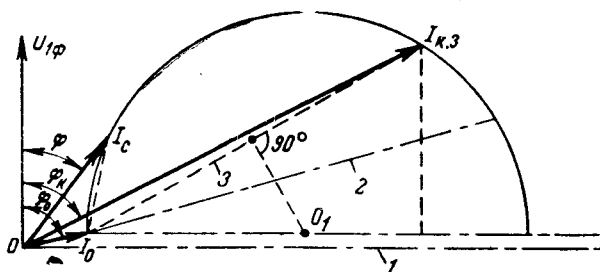


Рис. 3-9. Круговая диаграмма асинхронного двигателя.

1 — линия подводенной мощности; 2 — линия электромагнитной мощности (моментов); 3 — линия полезной мощности.

ра начинает резко падать только к концу разгона. Указанное явление иллюстрируется примерной осциллограммой (рис. 3-11,а) пуска асинхронного двигателя серии А без нагрузки.

Следует иметь в виду, что из-за большой кратности пускового тока в случае затяжного пуска создается опасность быстрого перегрева обмоток двигателя.

Двигатели краново-металлургические (МТ, МТК, МТВ и др.), предназначенные для частых повторных включений, характеризуются повышенной перегрузочной способностью, большими пусковыми моментами и относительно малыми пусковыми токами (рис. 3-10, кривые $M_{\text{м}}$, $I_{\text{м}}$) [Л. 15]. Благодаря большим пусковым моментам они разгоняются быстрее (рис. 3-11,б), чем двигатели таких же мощностей единой серии А. Недостатки краново-металлургических двигателей проявляются в повышенном скольжении, более низком к. п. д. и ухудшенном $\cos \varphi$.

В наиболее тяжелых условиях находятся специальные роликотные двигатели (серии АР); им приходится работать с большой частотой включений и осуществлять разгон (рис. 3-11,в) ролика и изделия, махо-

вые моменты которых в несколько раз превышают маховые моменты самого двигателя [Л. 15]. Повышенные пусковые моменты достигаются специальной конструкцией и, в частности, изготовлением обмотки ротора из материалов повышенного сопротивления.

При наладке предварительные испытания двигателей повторно-кратковременного режима ограничиваются

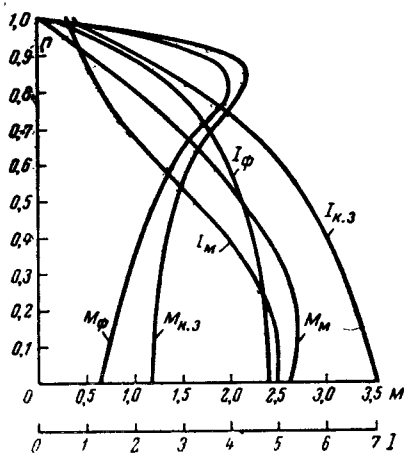


Рис. 3-10. Зависимость электромагнитного момента и тока асинхронного двигателя от скорости вращения ротора.

$M_{к.з}$, $I_{к.з}$ — двигатели с к. з. ротором единой серии (типа А); $M_м$, $I_м$ — двигатели кранометаллургические (серии МТК, МТ); $M_φ$, $I_φ$ — двигатели с фазным ротором при закороченном роторе.

пробным пуском совместно с механизмом. Если механизм легко трогается с места, то дальнейшие испытания уже относятся к области исследования режимов работы, а не собственно двигателя. В случаях, когда двигатель не может привести механизм в движение, рекомендуется выполнить следующее: а) измерить напряжение на всех трех фазах статора (следует учесть, что пусковой момент примерно пропорционален квадрату напряжения); б) измерить ток во всех трех фазах статора (токи должны быть равны и примерно соответствовать каталожному значению); в) укрепить рычаг на муфте двигателя и с помощью пружинного силомера или гири определить момент трогания механизма.

Этот момент $M_{т.м}$ должен быть меньше каталожного пускового момента двигателя $M_п$ ($M_{т.м} < \frac{M_п}{1,3 \div 1,5}$).

Асинхронные двигатели с фазным ротором при пуске по обычной схеме (рис. 3-12,а) находятся в таком же режиме, как двигатели постоянного тока, включаемые через пусковые сопротивления в цепи якоря. Характеристики электромагнитных моментов, соответствующие различным пусковым сопротивлениям, представлены на рис. 3-12,б. На рис. 3-12,в показаны осциллограммы изменения скорости n , тока статора I_c и тока ротора I_p

при трехступенчатом пуске асинхронного двигателя в функции времени.

Работа двигателя под нагрузкой. При наладке приводов, работающих в продолжительном режиме (вентиляторы, насосы, транспортеры и др.), сле-

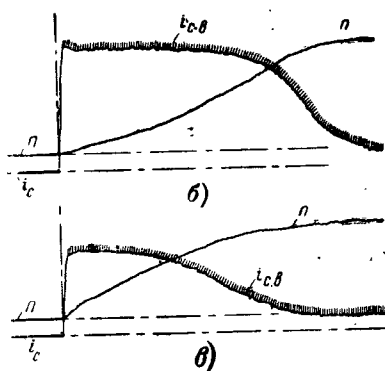
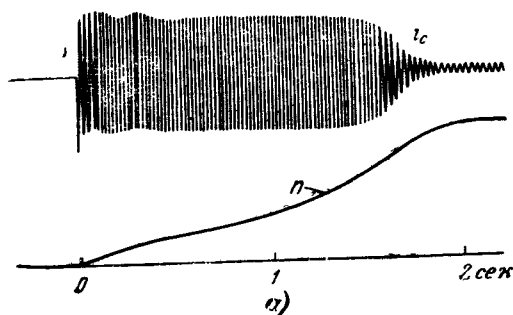


Рис. 3-11. Осциллограммы пуска асинхронных двигателей без нагрузки.

а — двигатель общепромышленного применения (типа А); б — двигатель краново-металлургический (серии МТК); в — двигатель рольганговый (серии АР); i_c — ток статора; $i_{c.в}$ — ток статора выпрямленный и отфильтрованный (см. схему на рис. 5-15); n — скорость ротора.

дует измерить токи статора, ротора и скорость вращения двигателя во время работы под нагрузкой. У машин мощностью свыше 40 кВт желательно измерить также величину скольжения, потребляемую мощность и рассчитать коэффициент мощности ($\cos \varphi$).

Токи, напряжения, мощности и $\cos \varphi$ измеряются и рассчитываются обычными методами с применением электромагнитных или электродинамических приборов классов 1—1,5 при прямом включении приборов или через трансформаторы тока и напряжения. Потребляемая мощность может быть измерена с достаточной точно-

стью при помощи однофазного ваттметра, так как нагрузка во всех трех фазах двигателя одинакова.

По данным электрических измерений может быть рассчитан статический момент нагрузки M_c на валу двигателя. Для этой цели предварительно определяется мощность P_d , передаваемая механизму,

$$P_d = P_c - \Sigma p = P_c - (p_{ж} + p_{мех} + p_m), \quad (3-13)$$

где P_c — потребляемая из сети мощность;

Σp — сумма всех потерь;

$p_m = 3I^2 r'_ф$ — потери в меди двигателя при нагрузке.

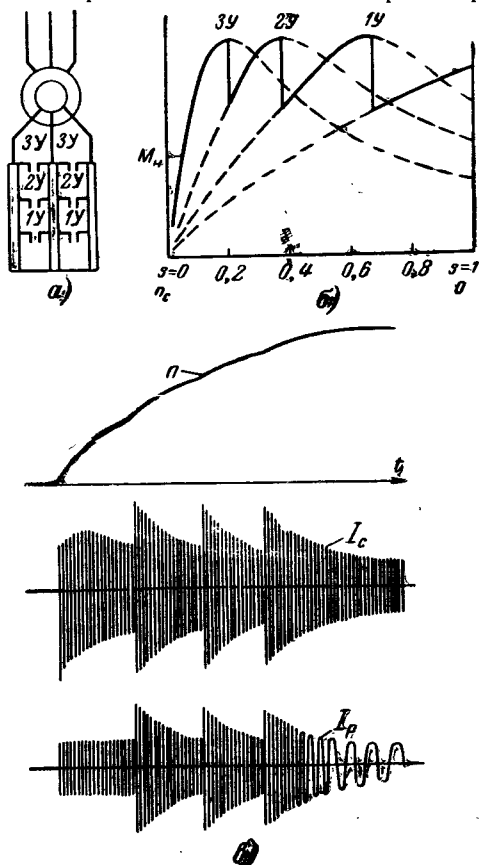


Рис. 3-12. Ступенчатый разгон асинхронного двигателя с фазным ротором.

а — схема управления; б — пусковая диаграмма; в — осциллограмма изменения скорости и токов во времени.

Потери в стали $p_{ж}$ и механические потери $p_{мех}$ определяются во время опыта холостого хода

$$p_{ж} + p_{мех} = P_0 - p_{м0} = P_0 - 3I_0^2 r'_{\phi}, \quad (3-14)$$

$p_{м0} = 3 I_0^2 r'_{\phi}$ — потери в меди при холостом ходе;
 r'_{ϕ} — полное активное сопротивление двигателя, определяемое расчетным путем по активным сопротивлениям обмоток статора и ротора или из опыта короткого замыкания.

Тогда

$$P_d = P_c - P_0 - p_{ж} + p_{м0} = P_c - P_0 - 3r'_{\phi} (I^2 - I_0^2); \quad (3-15)$$

$$M_c = 975 \frac{P_d}{n},$$

где M_c выражено в килограммометрах, P_d — в киловаттах, n — число оборотов в 1 мин.

При наладке крупных асинхронных двигателей с регулируемой нагрузкой желательно проверить их рабочие характеристики, дающие зависимость n (или s), M , I_1 , $\cos \phi$ и η (к. п. д.) от мощности на валу P_d (рис. 3-13). Для асинхронных двигателей с невыключаемыми сопротивлениями в цепи ротора следует также снять механическую характеристику $n = f(M_c)$.

Все характеристики снимаются при неизменном напряжении U_c и частоте f_c сети. В пределах нормально-

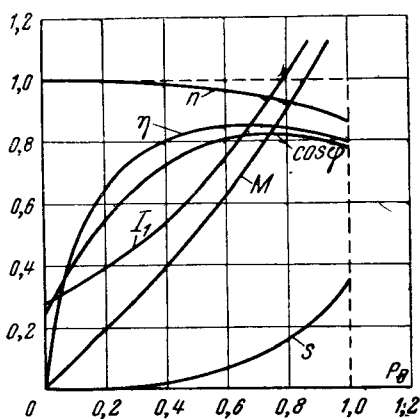


Рис. 3-13. Рабочие характеристики асинхронных двигателей.

го эксплуатационного изменения нагрузки производятся измерения напряжения U_c , тока статора I_1 , активной мощности P_c , скорости n (или скольжения s) и по этим данным рассчитываются все остальные величины.

Мощность на валу P_d и момент M_d рассчитываются, как указано выше, по активной мощности P_c , потребляемой из сети, величине потерь в двигателе и скорости ротора n :

$$\cos \varphi = \frac{P_c}{\sqrt{3} U_c I_1}; \quad \eta = \frac{P_d}{P_c}. \quad (3-16)$$

Если во время испытаний в цепи ротора остается невыключаемое сопротивление, то к величине потерь необходимо прибавить выделяемую в сопротивлении мощность $P_{\text{доп}} = 3 U_{p.f} I_{\phi}$.

Скольжение двигателей удобно определять стробоскопическим методом или с помощью индуктивной катушки.

У двигателей с фазным ротором скольжение может быть определено также с помощью магнитоэлектрического амперметра, включаемого в одну из фаз ротора, а при наличии невыключаемого сопротивления — с помощью вольтметра, присоединяемого к кольцам ротора. Рекомендуется применять приборы с двусторонней шкалой. Скольжение рассчитывается по числу полных колебаний стрелки прибора (подробнее см. гл. 5).

3-4. Снятие характеристик синхронных генераторов

В системах электропривода синхронные генераторы используются для питания двигателей, управляемых путем изменения частоты, и как источники стабильного напряжения. У таких генераторов, как и у генераторов постоянного тока, следует снять характеристики холостого хода (или намагничивания) $E_c = f(I_v)$ и короткого замыкания $I_c = f(I_v)$ при $n = \text{const}$, где E_c , I_c — э. д. с. и ток статора генератора; I_v — ток возбуждения генератора.

При снятии характеристики намагничивания $E_c = f(I_v)$ напряжение генератора повышается до значения, соответствующего номинальному току возбуждения, но не ниже 130% номинального напряжения, выдерживается в течение 5 мин, а затем снижается до нуля [Л. 3]. Это испытание одновременно является проверкой витковой изоляции обмотки статора, а также равенства фазных и линейных напряжений.

При снятии характеристики короткого замыкания $I_c = f(I_b)$ замыкаются все три фазы статора, причем желательно во всех фазах иметь амперметры. Путем увеличения возбуждения ток статора поднимается до номинального значения; величины токов во всех фазах могут отличаться друг от друга не более чем на 2—3%.

В приводах преобразователей частоты указанные характеристики необходимо снять при разных значениях рабочей скорости.

Во время испытаний под нагрузкой следует снять внешние характеристики $U_c = f(I_c)$ при $I_b = \text{const}$, а при возможности также регулировочные характеристики $I_b = f(I_c)$ при $U_c = \text{const}$.

По результатам испытаний для основного рабочего режима рекомендуется построить контрольную векторную диаграмму э. д. с. и токов [Л. 1], помогающую уяснить процессы, происходящие в синхронном генераторе.

3-5. Пуск и снятие характеристик синхронных двигателей

Пуск синхронного двигателя. В зависимости от характера привода, мощности двигателя и особенностей питающей сети применяются различные системы пуска: прямой, реакторный, автотрансформаторный, с постоянно подключенным возбудителем и др. Наладчик должен иметь в виду, что любой вид пуска сопряжен с опасностью появления чрезмерных напряжений на обмотках индукторов и нагревания пусковой клетки свыше допустимых пределов. Перенапряжения возможны в тех случаях, когда цепь индукторов окажется при пуске разомкнутой, не будет перекрытия контактов автомата гашения поля или перегорит разрядное сопротивление. Для надежности цепь возбуждения следует проверить до пуска двигателя путем включения на рабочее или пониженное напряжение через амперметр. По амперметру также удобно проверить перекрытие контактов автомата гашения поля во время медленного его включения от руки (практически перекрытие контактов часто создается растягивающейся между сухарями дугой).

Разрядные сопротивления обычно выбираются с запасом по мощности, но во время разгона возможно недопустимое повышение температуры контактных соединений из-за неплотной их затяжки; в дальнейшем эти контакты могут полностью разрушиться, выгореть и

создать разрыв цепи ротора. Поэтому после первого толчка двигателя и пробных включений необходимо проверить температуру всех элементов разрядного сопротивления.

Пусковая клетка синхронных двигателей рассчитана только на кратковременное прохождение тока. При нескольких пусках подряд или при затянувшемся асинхронном режиме с нагрузкой на валу пусковая обмотка перегревается выше допустимых пределов.

Рекомендуется производить не более трех пусков подряд с перерывом между ними не менее 1 мин. Следует иметь в виду, что нагревание обмоток не зависит от системы пуска (прямой, автотрансформаторный и др.), но будет тем больше, чем больше маховая масса привода и момент сопротивления.

Характер пуска синхронного двигателя во многом зависит от наладки элементов схемы управления. При реакторном и автотрансформаторном пуске важен подбор уровня пониженного напряжения и момента подачи полного напряжения (рис. 3-14). Интенсивность пуска обычно лимитируют допускаемые толчки тока питающей сети. Втягивание двигателя в синхронизм зависит от автоматического управления током возбуждения. Подрегулировку пускового режима желательно производить по анализу осциллограмм.

Снятие нагрузочной характеристики синхронного двигателя. Нагрузочная или U-образная характеристика $I_c = f(I_v)$ представляет зависимость тока статора от тока возбуждения при неизменном моменте сопротивления. U-образную характеристику рекомендуется снимать при наладке всех синхронных двигателей, так как она показывает, какие факторы могут влиять на коэффициент мощности сети, дает представление о запасе устойчивости двигателя, позволяет уточнить сопротивления реостата возбуждения, выбрать

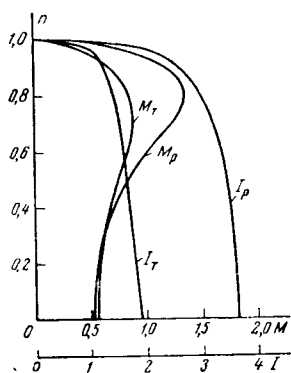


Рис. 3-14. Пусковые характеристики синхронных двигателей.

I_T , M_T — ток статора и электромагнитный момент при пуске через автотрансформатор; I_p , M_p — то же, но при пуске через реактор.

пусковое его положение, а в схеме автоматического управления — настроить параметры регулятора.

Характеристика снимается при рабочей схеме (например, по рис. 3-15, а) путем изменения тока возбуждения возбудителя (ОВВ) или регулируемого параметра иного источника питания возбуждения синхронного двигателя.

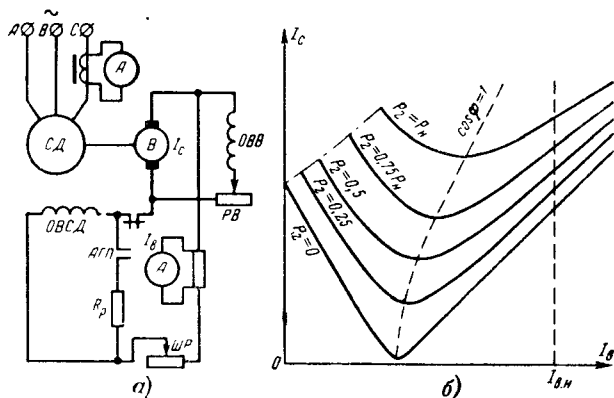


Рис. 3-15. Снятие нагрузочной U-образной характеристики синхронного двигателя.

а — схема; б — U-образные характеристики; I_c — ток статора; I_b — ток обмотки возбуждения; P_2 — мощность на валу.

В начале опыта ток статора (при повышении возбуждения) плавно поднимается до 110—125% номинального. С этого момента, не допуская длительного протекания повышенных токов статора и ротора, начинают запись показаний.

Ток возбуждения синхронного двигателя I_b (рис. 3-15, б) снижается ступенями до тех пор, пока ток статора I_c не достигнет минимального значения. При отсутствии нагрузки на валу двигателя (кривая $P_2=0$) мы получаем правую ветвь характеристики, соответствующую работе синхронного двигателя в качестве компенсатора с опережающим (емкостным) $\cos \phi$. В данном режиме двигатель может оставаться длительно, так как способствует повышению напряжения сети и сам работает устойчиво.

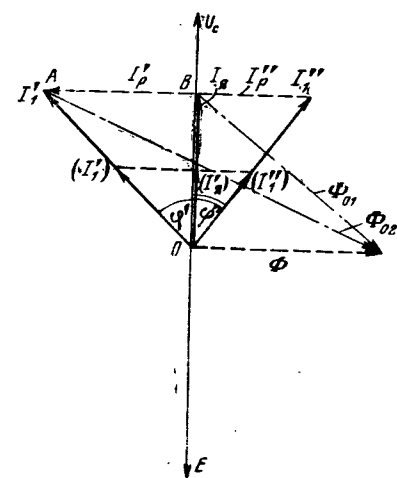
Левая ветвь характеристики снимается путем дальнейшего понижения возбуждения; при этом ток стато-

ра возрастает, а из сети поступает реактивная мощность.

Во избежание выпадания из синхронизма при снятии левой ветви характеристики ток статора повышается только до 60—80% номинального значения.

Аналогично описанному выше снимаются U-образные характеристики под нагрузкой.

Процессы, происходящие в синхронном двигателе при изменении возбуждения, удобно пояснить с помощью



векторной диаграммы. Отложим по вертикали (рис. 3-16) вектор напряжения сети U_c . Если момент сопротивления нагрузки постоянный $M_c = \text{const}$, то при увеличении или уменьшении возбуждения активная составляющая тока статора $I'_{я}$ будет оставаться неизменной.

На диаграмме показано изменение тока статора от значения I'_1 , соответствующего опережающему $\cos \varphi' = 0,7$, до значения I''_1 при отстающем $\cos \varphi'' = 0,8$. Реактивные составляющие тока представлены векторами

Рис. 3-16. Векторная диаграмма синхронного двигателя.

I'_p , I''_p . Уменьшение момента нагрузки приводит к снижению активной составляющей тока $I_{я}$ (например, до величины $I'_{я}$).

Пусть момент нагрузки равен нулю и реактивная составляющая тока также равна нулю. В этом случае ток статора можно считать равным нулю и э. д. с. двигателя E будет равна и противоположно направлена напряжению сети U_c . Магнитный поток, создающий э. д. с. E , может быть выражен (в относительных величинах в масштабе тока) вектором Φ . Если увеличивать момент нагрузки, одновременно поддерживая $\cos \varphi = 1$, до тех пор, пока ток статора не достигнет величины $I_{я}$, то результирующий магнитный поток двигателя возрастет до значения, определяемого вектором Φ_{01} .

Увеличивая возбуждение двигателя при неизменном моменте нагрузки, соответствующем активному току I_a , мы повышаем реактивную составляющую тока; ток статора I постепенно возрастает до величины I'_1 (при $\cos \varphi = 0,7$), а магнитный поток — до величины Φ_{02} .

Глава четвертая

УПРАВЛЯЮЩИЕ И ИЗМЕРЯЮЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

4-1. Область применения и перспективы развития управляющих и измеряющих машин

В последние годы все более настойчиво проявляется тенденция применения статических (невращающихся) регуляторов, построенных на основе магнитных усилителей или на использовании понных, тиристорных, тиатронных или транзисторных элементов [Л. 24, 40]. Эта тенденция закономерна, и, по мнению автора, электромашинные усилители (ЭМУ) уже не перспективны, несмотря на существенные достоинства и высокую эксплуатационную надежность.

Однако ЭМУ широко распространены в эксплуатации, их продолжают применять в проектах благодаря простоте схем реверсивного управления, и наша промышленность выпускает несколько типовых конструкций ЭМУ мощностью от 30 вт до 60 квт. Будут использоваться ЭМУ для питания якорей небольших двигателей повторно-кратковременного режима (например, для управления электродами дуговых печей), а также для возбуждения генераторов. Автор полагает, что верхний предел мощности применяемых ЭМУ вскоре не будет превышать 5 квт. Работы в области усовершенствования ЭМУ, управляемых возбудителей, роторолов, вероятно, будут ограничены.

В схемах электроприводов особое место занимают машины, используемые в качестве датчиков скорости — тахогенераторов. Общее и процентное количество электроприводов с регулируемой скоростью все время возрастает. В настоящее время большинство управляемых двигателей сочленяется с тахогенераторами. Применяются тахогенераторы постоянного тока, синхронные, асинхронные и индукторные [Л. 22]. Свойства тахогене-

раторов и устройств их подсоединения заметно влияют на статическую чувствительность, быстродействие и устойчивость систем управления. Устройства контроля скорости являются узким местом в некоторых современных системах авторегулирования, и над усовершенствованием тахогенераторов работает ряд специализированных организаций. Наряду с усовершенствованием тахогенераторов, создаются системы контроля скорости по частоте; однако исследования показывают, что для снижения оборотных (низкочастотных) погрешностей счетные системы также должны питаться от особых тахогенераторов. По мнению автора, для электроприводов средних и больших мощностей наиболее перспективными являются индукторные и синхронные тахогенераторы. Выходная мощность указанных тахогенераторов благодаря развитию усилителей с полупроводниковыми модулями на входе будет снижаться до 5—10 вт.

Для квалифицированной наладки электроприводов необходимо изучить свойства собственно тахогенераторов, устройств их подсоединения к двигателю и выходных элементов обратной связи — потенциометров, трансформаторов, фильтров.

Применение силовых сельсинов в промышленности снижается, но в качестве датчиков синхронной связи, источников заданного сигнала, фазорегуляторов все шире применяются указывающие и управляющие сельсины.

Программные реле и устройства приводятся в движение с помощью специальных микродвигателей различных типов; применение микромашин в промышленности быстро возрастает. Вопросы их теории освещены в специальных курсах [Л. 20, 21]; в данной работе даны только краткие рекомендации о проверке надежности вводимых в действие микромашин.

4-2. Электромашинные усилители

Электромашинный усилитель ЭМУ (рис. 4-1) представляет собой генератор постоянного тока специальной конструкции с весьма малой мощностью возбуждения, составляющей всего порядка 0,01% по отношению к мощности машины.

Значительный коэффициент усиления ЭМУ по мощности (до 10 000) достигается использованием реакции поперечного поля якоря для возбуждения э. д. с. в ос-

новном контуре, т. е. между щетками $Я_1$ — $Я_2$. Малая мощность возбуждения позволяет вводить большие форсировки управления и сокращать до сотых долей секунды время переходных процессов в ЭМУ. Получение желаемых рабочих характеристик электропривода облегчается возможностью широкой регулировки наклона внешних характеристик.

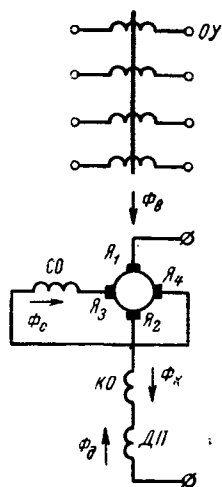


Рис. 4-1. Схема обмоток и магнитных потоков электромашиного усилителя.

Магнитные потоки: Φ_v — обмоток управления ОУ; Φ_d — добавочных полюсов ДП; Φ_k — компенсационной обмотки КО; Φ_c — последовательной обмотки СО.

В переходном режиме форсирование, т. е. мгновенное повышение напряжения на якоре до 1,75 номинального и 5-минутное повышение напряжения до 1,3 номинального при номинальном токе якоря допускают ЭМУ всех мощностей. При номинальном напряжении ЭМУ допускают двукратную перегрузку якоря по току в течение 3 сек и мгновенную четырехкратную перегрузку при половинном номинальном напряжении. Обмотки возбуждения, действующие обычно навстречу друг другу, рассчитаны на длительное прохождение токов управления, в 5—10 раз превышающих номинальные токи.

Каждый электромашиный усилитель перед настройкой системы управления электроприводом должен пройти индивидуальную наладку по следующей программе:

1) очистка и продувка машины, проверка свободного хода;

2) проверка изоляции всех обмоток по отношению к корпусу машины и между собой;

3) измерение сопротивлений постоянному току обмоток управления, якоря, компенсационной обмотки и шунтирующего сопротивления (на рис. 4-1 не показано);

4) определение полярности выводов обмоток;

5) проверка направления вращения и притирка щеток;

6) установка щеток на электрическую нейтраль;

я*

7) снятие характеристики намагничивания и контроль соотношения числа витков обмоток управления;
8) снятие внешних характеристик и настройка компенсации;

9) снятие нагрузочной характеристики.

Наладочные операции, указанные в первых трех пунктах программы, проводятся так же, как при наладке машин постоянного тока.

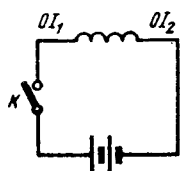
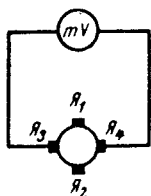


Рис 4-2. Схема для проверки установки щеток ЭМУ.

Определение полярности выводов обмоток. Предварительно проверяют целостность обмоток, а затем индуктивным методом определяется полярность выводов на зажимах. Начала обмоток управления помечены индексом 1 (OI_1 , OII_1 , $OIII_1$, OIV_1), концы — индексом 2 (OI_2 , OII_2 , $OIII_2$, OIV_2).

К началу одной из обмоток управления подается напряжение от зажима «плюс» аккумулятора или сухого элемента; зажим «минус» подключен к концу обмотки. В этот момент стрелка милливольтметра, подключенного к любой иной обмотке (зажимом (+) к началу и зажимом (—) к концу) должна отклониться вправо. Таким

же способом может быть проверена полярность щеток поперечной оси по отношению к обмоткам управления. Щетки при этом должны быть разомкнуты.

В усилителях типа АГ-3, помимо проверки полярности обмоток, таким же методом проверяется полярность выводов последовательной обмотки $C_1—C_2$ (вывод C_1 должен быть началом обмотки).

Проверка направления вращения и притирка щеток. Проверяется правильность направления вращения приводного двигателя и производится притирка щеток ЭМУ. Для этого машина вращается на холостом ходу в течение 5—10 ч. Ускорить притирку щеток и улучшить ее качество можно, подключив к якорю малое нагрузочное сопротивление и возбуждив ЭМУ от аккумулятора в такой степени, чтобы ток достиг 30—40% номинального. Однако притирка щеток под нагрузкой грозит самовозбуждением, вызывающим недопустимое возрастание тока, и может выполняться только при на-

личии достаточного опыта с обязательной установкой в якорной цепи предохранителя (или автомата), рассчитанного на отключение номинального тока якоря.

Установка щеток на электрическую нейтраль. Установка щеток на нейтраль производится индуктивным методом так же, как для обычных машин постоянного тока. Все четыре щетки усилителей типа ЭМУ установлены на одной траверсе. Для отыскания нейтрали этих усилителей собирается схема испытаний, приведенная на рис. 4-2.

Основные и замкнутые щетки усилителей типа АГ-3 укреплены на двух отдельных траверсах и уставляются на нейтраль независимо. Для отыскания нейтрали усилителей типа АГ-3 сначала собирается схема по рис. 4-2, позволяющая правильно установить и закрепить травесу со щетками поперечной оси $Я_3—Я_4$. Затем собирается схема, приведенная на рис. 4-3, и уставляются на нейтраль щетки продольной оси $Я_1—Я_2$. В данном случае ток якоря при импульсном включении может составлять $(0,1 \div 0,3) I_{\text{н}}$.

Снятие характеристики намагничивания. С целью получения данных для настройки схемы управления, установления исправности ЭМУ, окончательной проверки полярности и соотношения числа витков обмоток управления снимается характеристика холостого хода или намагничивания усилителя. Характеристика намагничивания ЭМУ снимается так же, как и для обычных машин постоянного тока. При испытании необходимо иметь в виду, что качество притирки, степень нажатия и материал щеток сильно влияют на форму характеристики в области малых напряжений.

Подачу напряжения на обмотки возбуждения следует осуществлять через два потенциометра $ПТ_1$ и $ПТ_2$ (рис. 4-4,а) для возможности регулировки напряжения в весьма малых пределах. Для удобства перемагничивания к первому потенциометру $ПТ$ (рис. 4-4,в) можно подключить два дополнительных потенциометра $ПТ_1$ и $ПТ_2$ и обмотку возбуждения ЭМУ включить между их движками.

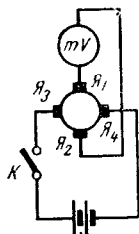


Рис. 4-3. Схема для проверки установки щеток АГ-3.

Применимо также включение потенциометра $ПТ$ с малым сопротивлением 20—40 ом последовательно с добавочным сопротивлением R_d порядка 100—500 ом (рис. 4-4,б). Характеристика намагничивания должна быть снята в диапазоне напряжений от +1,3 до $-1,3 U_H$ (порядка 330 в при $U_H=230$ в) только для одной из обмоток ЭМУ.

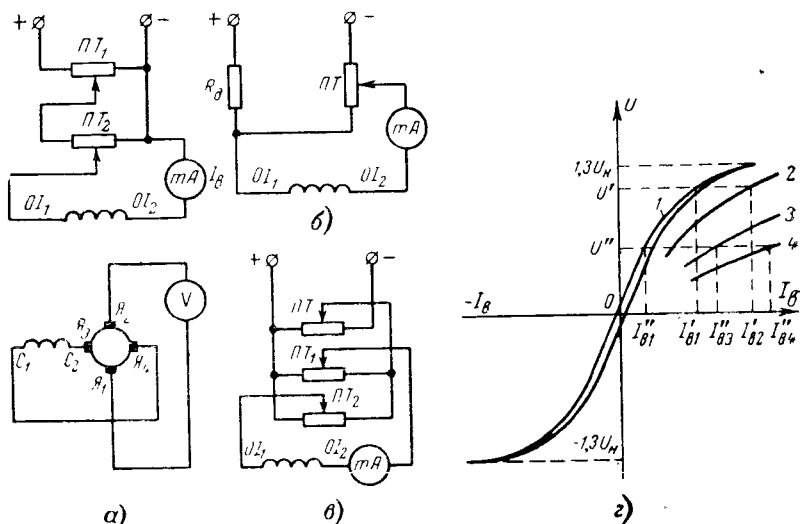


Рис. 4-4. Снятие характеристики холостого хода ЭМУ.

а — схема с двумя потенциометрами; б — то же с потенциометром и добавочным сопротивлением; в — то же с тремя потенциометрами; г — характеристики холостого хода ЭМУ.

Кроме того, желательно на очень короткое время повысить напряжение ЭМУ до $1,75 U_H$ (400 в при $U_H=230$ в) и измерить соответствующий ток возбуждения.

Помимо основной характеристики (кривая 1 на рис. 4-4,г), снимается несколько точек характеристик намагничивания путем поочередного питания остальных обмоток возбуждения ЭМУ. Дополнительные характеристики (кривые 2—4) достаточно снять в зоне больших напряжений одной полярности.

Сравнивая измеренные величины токов возбуждения разных обмоток, создающие одно и то же напряжение на якоре ЭМУ, можно получить соотношение чисел вит-

ков этих обмоток, а при желании по основной, подробно снятой характеристике, построить остальные характеристики намагничивания.

Напряжению U' соответствуют одинаковые н. с. первой и второй обмоток $F_1 = F_2$. Из равенства н. с. следует:

$$\frac{I'_{n1}}{I'_{n2}} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Напряжению U'' соответствуют н. с. $F''_1 = F''_3 = F''_4$, откуда

$$\frac{I'_{n1}}{I'_{n3}} = \frac{w_3}{w_1}; \quad \frac{I''_{n1}}{I''_{n4}} = \frac{w_4}{w_1}.$$

Соотношение чисел витков обмоток может быть также проверено дифференциальным методом.

В качестве примера на рис. 4-5 приведена типовая характеристика намагничивания ЭМУ-25. Так же, как ЭМУ-25, ЭМУ других габаритов при н. с., равной 40 ав, создают напряжение на якоре порядка 230 в.

Форма характеристики намагничивания, полученной экспериментальным путем, часто отличается от типовой характеристики ЭМУ; обычно это связано с неточной установкой щеток ЭМУ на нейтраль. Однако опыт наладки показывает, что многократная подгонка нейтраки приводит к повреждению щеткодержателей. Поэтому повторную регулировку положения нейтрали следует производить только в тех случаях, когда полученные характеристики машины не дают возможности обеспечить заданный режим управления.

Весьма чувствительны ЭМУ к сдвигу щеток от электрической нейтрали. Небольшой сдвиг щеток против направления вращения якоря вызывает резкое увеличение напряжения ЭМУ. Сдвиг щеток по вращению вызывает размагничивание и резкое уменьшение напря-

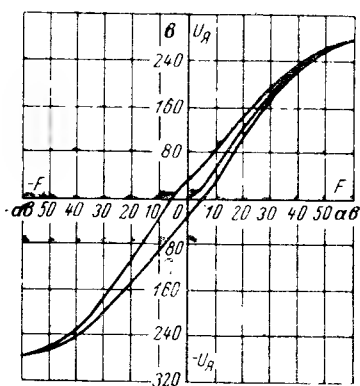


Рис. 4-5. Типовая характеристика намагничивания ЭМУ-25.

жения ЭМУ. Указанная зависимость иллюстрируется характеристиками на рис. 4-6.

Сдвиг щеток ЭМУ против направления вращения, несмотря на резкое повышение чувствительности, не применяется, так как грозит чрезмерными перенапряжениями. Для компенсации возможного сдвига нейтрали в ходе эксплуатации рекомендуется смещение щеток в сторону вращения на 1—2 мм.

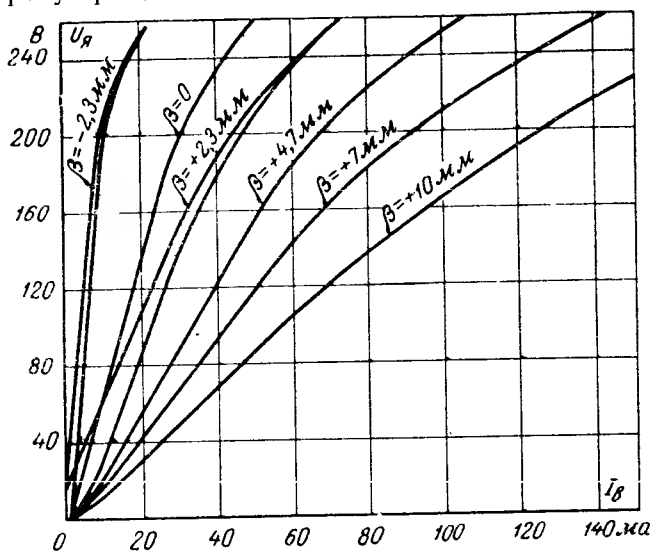


Рис. 4-6. Кривые холостого хода ЭМУ-25 при различном сдвиге щеток с нейтрали (на угол $\pm\beta$).

Современные схемы авторегулирования имеют большой запас по коэффициенту усиления, и ослабление чувствительности ЭМУ обычно допустимо.

Настройка компенсации. Размагничивающее действие реакции якоря по продольной оси в электромашинных усилителях проявляется значительно сильнее, чем в обычных генераторах постоянного тока, и для ее резкого снижения служит специальная компенсационная обмотка КО, по которой проходит ток якоря. Намагничивающая сила КО несколько превышает н. с. реакции якоря, вследствие чего во избежание недопустимого повышения напряжения ЭМУ с ростом нагрузки предусматривается шунтирование компенсационной обмотки специальным сопротивлением R_K (рис 4-7,а).

От величины R_K зависит форма внешних характеристик ЭМУ (рис. 4-7,б), дающих зависимость напряжения на якоре от тока нагрузки при постоянном возбуждении: $U=f(I)$ при $I_B=\text{const.}$ Подбор подходящей внешней характеристики путем изменения сопротивления R_K принято называть настройкой компенсации ЭМУ. Обычно приемлемой считается такая внешняя характеристика, при которой напряжение с ростом тока нагрузки от холостого хода до номинального снижается на 15—20%.

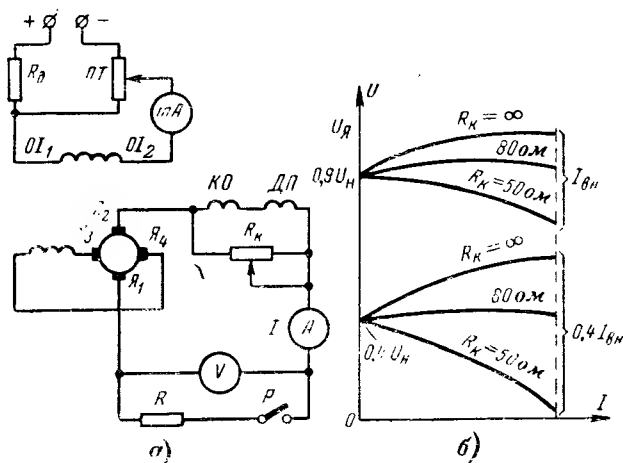


Рис. 4-7. Снятие внешних характеристик ЭМУ.
а — схема измерения; б — примерные внешние характеристики ЭМУ-25-3000.

Внешние характеристики снимаются с помощью схемы, приведенной на рис. 4-7,а. Характеристики снимаются для трех-четырех значений сопротивления R_K , шунтирующего компенсационную обмотку, и для двух-трех значений возбуждения ЭМУ.

При пониженном возбуждении действие компенсационной обмотки сказывается более резко, чем при полном возбуждении.

С помощью схемы, собираемой для снятия внешних характеристик, следует проверить безыскровую коммутацию щеток ЭМУ: при номинальном напряжении и токе якоря, вдвое превышающем номинальный в течение

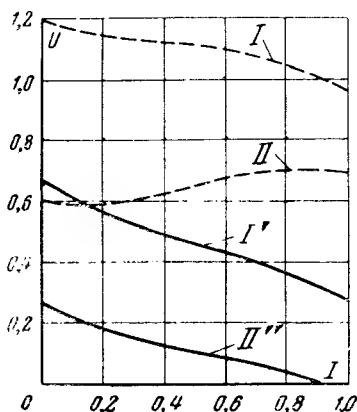
3—5 сек, и при половинном напряжении и мгновенном четырехкратном токе якоря.

Снятие нагрузочной характеристики. С целью получения исходных данных, необходимых при расчетах установившихся режимов, дополнительно к внешним характеристикам снимается характеристика ЭМУ $U=f(I_{\text{в}})$, соответствующая фактическому сопротивлению нагрузки. При снятии нагрузочной характеристики собирается обычная схема плавного подъема

возбуждения (см. рис. 4-4), а якорь ЭМУ включается на рабочее сопротивление, например, на обмотку возбуждения неподвижного генератора.

Настройка компенсации ЭМУ, работающего в качестве возбудителя. Наибольшее использование по напряжению и мощности ЭМУ, работающего в качестве возбудителя, будет иметь место в том случае, когда его рабочая характеристика $U=f(I_{\text{в}})$ при $R=\text{const}$ приблизится к характеристике холостого хода. Для получения оптимальной характеристики следует

Рис. 4-8. Внешние характеристики ЭМУ при сдвиге щеток поперечной цепи по направлению вращения на $2,5^\circ$.



осторожно регулировать сопротивление $R_{\text{к}}$ таким образом, чтобы при напряжении $1,3 U_{\text{н}}$ ток якоря составлял $1,3 I_{\text{н}}$. Во избежание самовозбуждения, возможного при последующей длительной эксплуатации, приходится все же устанавливать сопротивление $R_{\text{к}}$ несколько заниженным (на 10—15%) против значения, определяющего оптимальную рабочую характеристику.

Выше было отмечено, что сдвиг щеток ЭМУ по вращению приводит к понижению напряжения холостого хода. Наряду с этим внешние характеристики выпрямляются и получают достаточный наклон.

В качестве примера на рис. 4-8 пунктиром показаны внешние характеристики ЭМУ, соответствующие расположению щеток на нейтрали; сплошными линиями нанесены характеристики, полученные после сдвига щеток.

4-3. Тахогенераторы

Основные требования, предъявляемые к тахогенераторам

Во многих регулируемых электроприводах тахогенераторы (ТГ) используются для питания вольтметров постоянного тока; вольтметры градуируются в единицах угловой скорости, *об/мин*, а иногда в единицах линейной скорости, *м/сек*. От ТГ, питающих вольтметры, требуется постоянство коэффициента передачи $k_T = U_T/n$ при возможном изменении температуры и внешних магнитных полей.

Наладчик практически не может влиять на стабильность коэффициента передачи, но он должен проверить надежность ТГ (см. § 1-1) и снять основные характеристики: характеристику намагничивания $U_T = f(I_B)$ (при $n = \text{const}$) и скоростную $U_T = f(n)$ при $I_B = \text{const}$.

В системах авторегулирования с обратной связью по скорости от тахогенератора требуется не только указанная выше стабильность, но и низкий уровень пульсаций выходного напряжения. На работу быстродействующих электроприводов особенно сильно влияют оборотные — низкочастотные пульсации, так как их не представляется возможным отфильтровать без ухудшения динамических свойств системы [Л. 22, 24].

Допустимый уровень оборотных пульсаций $\Delta U_{об}$ оценивается в зависимости от характера электропривода. Для большинства регулируемых механизмов прокатных станов, металлообрабатывающих станков, подъемников считается приемлемым $\Delta U_{об} \leq 1 \div 2\%$. Следящие системы бумажного привода, прокатных клетей и иных агрегатов в отношении оборотных пульсаций предъявляют весьма высокие требования $\Delta U_{об} \leq 0,1 \div 0,2\%$.

Оборотные пульсации зависят не только от свойств ТГ, но и от способа сочленения ТГ с приводом [Л. 22]. Поэтому в ответственных электроприводах наладчик должен получить данные о пульсациях собственно ТГ, а затем о пульсациях, имеющих место после центровки ТГ на рабочем месте.

Согласно теории и экспериментальным данным [Л. 32] при сочленении через обычную пальчиковую муфту параллельное смещение вала ТГ относительно вала двигателя приводит к появлению периодических колебаний скорости Δn_T и напряжения тахогенератора с длительностью периода, равной времени одного оборо-

та вала. Амплитуды пульсаций $\Delta n'_{об}$ и $\Delta U'_{об}$ (в относительных единицах) могут быть определены из простого соотношения

$$\Delta U'_{об} = \Delta n'_{об} = \frac{2a}{R}, \quad (4-1)$$

где a — величина параллельного смещения между осями валов; R — расстояние по радиусу от оси ТГ до оси пальца полумуфты.

По опытным данным эксплуатации оборотные пульсации, вносимые соединительной муфтой, составляют 1,5—5%.

При угловом смещении валов ТГ и двигателя пульсации имеют вдвое большую частоту; их амплитуда не зависит от размера полумуфт (от радиуса R) и определяется только углом перекоса α

$$\Delta U''_{об} = \Delta n''_{об} = 2(1 - \cos \alpha). \quad (4-2)$$

В некоторых конструкциях полумуфт $\Delta U''_{об} = 2(1 - \cos^2 \alpha)$. С точки зрения оборотных пульсаций можно допустить угловое смещение порядка 2—4°.

Методика центровки и рекомендуемые нормы приведены в § 1-5.

Следует отметить, что вопрос о резком снижении оборотных пульсаций решается путем применения подвесных — плавающих конструкций ТГ. В таких конструкциях [Л. 22] вал ТГ жестко закрепляется на торце вала двигателя, а статор (корпус) опирается на подшипники и только удерживается от проворачивания.

Наряду с оборотными пульсациями ТГ постоянного тока обладают полюсными пульсациями $\Delta U_{пол}$, связанными с магнитной несимметрией и зубцовыми пульсациями $\Delta U_{зуб}$, зависящими от формы зубцов ротора (рис. 4-9). Форма выходного напряжения ТГ определяется наложением оборотных, полюсных, зубцовых и коллекторных пульсаций.

Коллекторные пульсации очень маломощны, сглаживаются легким фильтром и на работе регуляторов скорости, даже при электронном входе, не сказываются. Зубцовые пульсации достигают 0,5% и более, но так же как и коллекторные, имеют довольно большую частоту, благодаря чему легко сглаживаются.

У ТГ, распространенных в промышленности, полюсные пульсации составляют не менее $\pm 0,7\%$. Эта величина в 2-3 раза выше требований, предъявляемых, например, прокатными приводами, но, поскольку схема привода заглубляется в отношении обратных пульсаций, она становится мало чувствительна и к полюсным пульсациям.

Тахогенераторы переменного тока, используемые в схемах обратной связи, должны быть проверены на величину пульсаций выпрямленного напряжения. При синусоидальной форме линейного напряжения и шести-фазном выпрямлении зубцовые пульсации составляют 14% (от амплитуды синусоиды); при 12-фазном выпрямлении — порядка 4%. Пульсации выпрямленного напряжения повышенной частоты легко сглаживаются, но при ограниченно линейных характеристиках регулятора скорости приводят к уменьшению коэффициента усиления системы. Поэтому при наладке чувствительных электроприводов с помощью электронного осциллографа необходимо оценить характер зубцовых пульсаций напряжения.

Снятие характеристик. При снятии характеристик (намагничивания, скоростной, внешней) ТГ может приводиться во вращение любым маломощным двигателем с достаточным диапазоном регулирования скорости и сочленяться при помощи муфты, зубчатой или ременной передачи.

В ряде случаев для испытаний удобно устанавливать ТГ на обычном токарном станке (рис. 4-10). Различные скорости якоря (ротора) ТГ получаются путем переключения коробки скоростей.

Для производства измерений применяются тщательно проверенные тахометр, вольтметр и амперметр класса не ниже 0,5.

При помощи тахометра скорость может быть измерена с точностью до 2%; относительные величины ско-

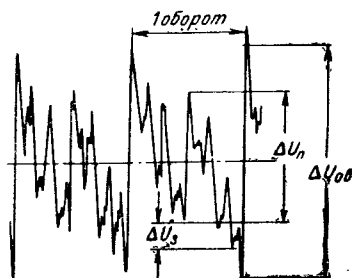


Рис. 4-9. Примерные пульсации напряжения тахогенератора постоянного тока.

$\Delta U_{об}$ — скоростные (оборотные);
 ΔU_n — полюсные; ΔU_z — зубцовые.

рости, требующиеся, например, для оценки линейности скоростных характеристик, могут быть определены с точностью до 0,2% стробоскопическим методом при пользовании неоновой лампой, питаемой от сети промышленного напряжения. Абсолютную величину скорости с точностью до 0,2% также можно определить стробоскопическим методом, но неоновая лампа в этом случае должна питаться от источника напряжения стабилизированной частоты.

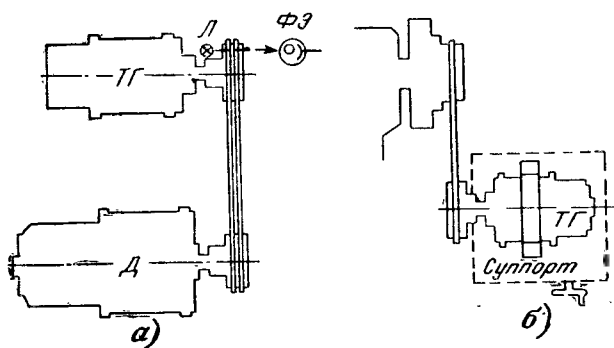


Рис. 4-10. Установка тахогенератора на суппорте токарного станка.

Более точные методы измерений описаны в гл. 5. Снятие характеристик ТГ рекомендуется производить в следующем порядке.

1. С помощью схемы, приведенной на рис. 4-11, а при неизменной скорости n_0 снимается характеристика

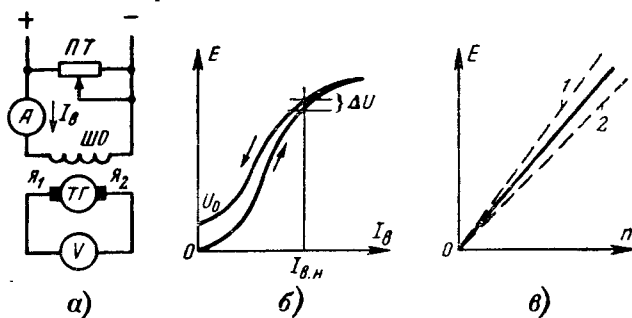


Рис. 4-11. Характеристики тахогенератора постоянного тока.

а — схема; б — характеристика намагничивания; в — градуировочные характеристики.

намагничивания $E=f(I_B)$. Во время испытаний скорость n_0 должна быть близка к рабочей скорости привода. По характеристике намагничивания (рис. 4-11,б) уточняется величина тока возбуждения, принимаемого в качестве номинального $I_{B.H}$ и при последующих испытаниях поддерживаемого неизменным. Следует иметь в виду, что вследствие действия остаточного магнетизма при одинаковой скорости и одинаковом токе возбуждения могут иметь место разные, отличающиеся на 1—3% (см. ΔU на рис. 4-11,б) величины напряжения.

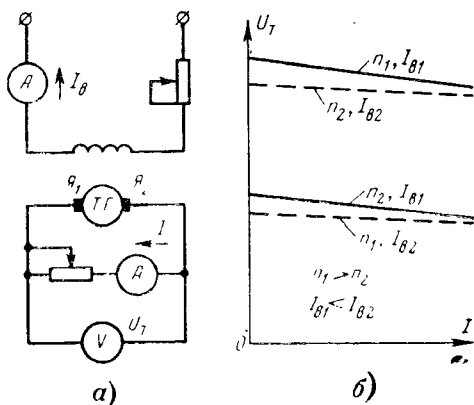


Рис. 4-12. Внешние характеристики тахогенератора постоянного тока.

а — схема; б — внешние характеристики.

2. Снимаются скоростные характеристики $E=f(n)$ при $I_B=I_{B.H}=\text{const}$. Первоначально ток возбуждения поднимается до величины $1,2 I_{B.H}$, а затем снижается до $I_{B.H}$; после этого ступенями увеличивается скорость ТГ, записываются характеристики $U'=f(n)$ и на чертеж (рис. 4-11,б) наносится характеристика 1. Скорость ТГ снижается до нуля, ток возбуждения снижается до нуля, а затем вновь поднимается до $I_{B.H}$, снимается характеристика 2. Скоростная характеристика, по которой градуируются таховольтметры, проводится как средняя линия между экспериментально снятыми характеристиками 1 и 2.

При подключении к тахогенератору вольтметров или многоомных резисторов с общим сопротивлением не менее 20 ком напряжение якоря U можно считать рав-

ным э. д. с. E . В схемах электроприводов с обратной связью по скорости к ТГ подключаются обычно потенциометры, имеющие сопротивление 200—2000 ом. При этом напряжение U на якоре ТГ значительно ниже э. д. с. E (падение составляет 1—15%), но скоростные характеристики сохраняют высокую линейность, если сопротивление нагрузки R якоря будет неизменным.

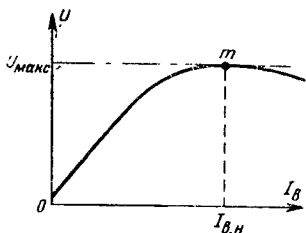


Рис. 4-13 Характеристика намагничивания индукторного тахогенератора.

Во время наладки скоростные характеристики должны сниматься при таком же неизменном сопротивлении потенциометра, так в нормальном рабочем режиме $R = R_{\text{н}} = \text{const}$ и при токе возбуждения $I_{\text{в}} = I_{\text{в.н}} = \text{const}$. По данной характеристике градуируются таховольтметры и рассчитываются параметры регулятора скорости.

3. В приводах с переменной нагрузкой на выходе ТГ снимаются внешние характеристики $U_{\text{т}} = f(I)$ при $n = \text{const}$. Ток якоря (статора) изменяется путем постепенного выведения реостата, подключаемого к ТГ и имитирующего нагрузку (рис. 4-12, а).

4. При наладке следящих приводов высокой чувствительности бывает необходимо иметь данные о зависимости напряжения ТГ от температуры корпуса и обмоток. Указанную зависимость $U = f(t^{\circ}\text{C})$ при $n = \text{const}$, $R = \text{const}$ проще всего определить, подогревая корпус ТГ посторонним источником тепловой энергии, например с помощью электроплитки или рефлектора. На первый взгляд такое испытание кажется примитивным и неправильным. Однако практически оно дает необходимое представление о стабильности характеристики. Например, при изменении температуры корпуса ТГ типа GGG3a на $\Delta t^{\circ} = 20^{\circ}\text{C}$ его напряжение изменяется на $\Delta U_{\text{т}} = 1 \div 1,5\%$, при $\Delta t^{\circ} = 40^{\circ}\text{C}$ $\Delta U_{\text{т}} = 1,5 \div 3\%$. У ТГ типа ТМГ-30 температурная чувствительность в 1,5—2 раза выше; испытания показывают, что индукторные ТГ типа ТТ при $\Delta t^{\circ} = 60^{\circ}\text{C}$ изменяют выходное напряжение не более чем на 0,3%.

Последнее время в промышленности все большее применение находят индукторные ТГ [Л. 22], характери-

стика намагничивания которых имеет горизонтальный участок (рис. 4-13). Номинальный ток возбуждения таких ТГ должен соответствовать максимуму (точка m) кривой намагничивания.

Ниже описаны способы оценки линейности скоростных характеристик ТГ, ранее не освещавшиеся в литературе. Для снятия скоростной характеристики с высокой точностью и получения данных о ее нелинейности удобно производить пропорциональное переключе-

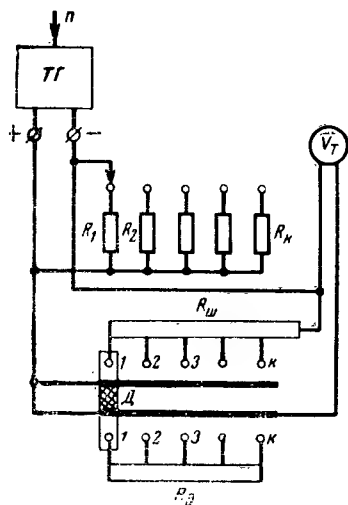


Рис. 4-14. Схема для снятия скоростных характеристик при переключении вольтметра и выравнивании сопротивления нагрузки.

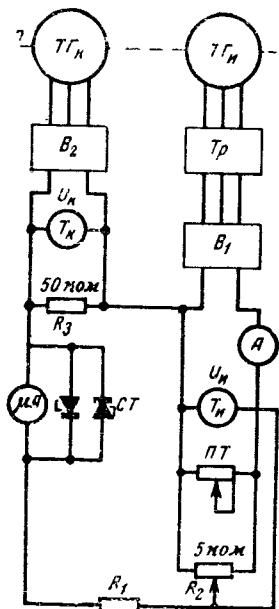


Рис. 4-15. Снятие скоростных характеристик с использованием контрольного тахогенератора.

чение пределов измерений вольтметра. Если измерять напряжения ТГ при нескольких скоростях $n_1, n_2=n_1N_2; n_3=n_1N_3; \dots; n_i=n_1N_i$ и одновременно в таком же отношении ($N_2, N_3, \dots, N_i$) изменять полное сопротивление цепи вольтметра (миллиамперметра), то стрелка вольтметра будет оставаться примерно на одном и том же делении. В этом случае вольтметр будет давать показания с одинаковой погрешностью по шкале Δa и погрешность визуальных наблюдений δa также станет примерно одинаковой.

Узлы контроля скорости с ТГ переменного тока имеют мягкие внешние характеристики и чувствительны даже к изменению сопротивления вольтметра. Поэтому, изменяя добавочные сопротивления R_d в цепи вольтметра (рис. 4-14), желательно одновременно в определенном отношении изменять параллельные сопротивления $R_{ш}$.

Величины добавочного $R_{дi}$ и параллельного $R_{шi}$ сопротивления на ступени i находятся из соотношения

$$R_{дi} = R_b N_i; R_{шi} = R_b \frac{N_i}{N_i - 1}, \quad (4-3)$$

где R_b — сопротивление цепи вольтметра при минимальной скорости (движок D в положении «1»); $N_i = n_i/n_1$ — отношение величин сравниваемых скоростей.

Снятие характеристик ТГ удобно производить с помощью вспомогательного — контрольного ТГ по методу встречного включения. Испытуемый ТГ_и включается на нагрузочный потенциометр ПТ (рис. 4-15), контрольный ТГ_к (связанный с тем же приводным валом) питает только многоомный резистор R_3 и таховольтметр T_k . Оба ТГ включены встречно через микроамперметр μA и балластные сопротивления R_1, R_2 . Защита микроамперметра осуществляется

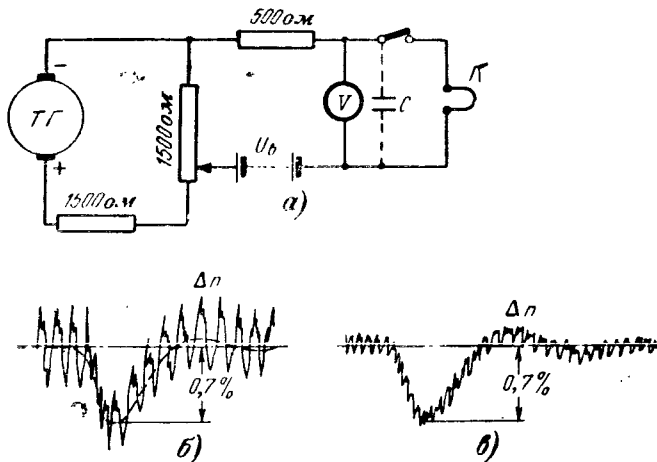


Рис. 4-16. Измерение напряжения и скорости дифференциальным методом.

a — схема; $б$ — осциллограмма изменения скорости во времени; $в$ — то же, но при подключенном конденсаторе C .

с помощью стабилитронов $СТ$. На схеме показаны трехфазные тахогенераторы и трансформатор Tr , используемый в рабочей схеме. Сравниваются напряжения постоянного тока, полученные с помощью выпрямителей B_1 и B_2 . Для определения нелинейности скоростных характеристик напряжение $U_{и}$, снимаемое с потенциометра $ПТ$, при максимальной скорости n_m подбирается равным напряжению U_k контрольного ТГ. После достижения состояния баланса, устанавливаемого по нулевому положению μA , скорость приводного двигателя постепенно снижается. По максимальному отклонению I_{μ} определяется искомая нелинейность $\Delta U_{и}$

$$\Delta U_{и} \approx I_{\mu} (R_1 + R_2); \Delta U_{и}\% = \frac{I_{\mu} (R_1 + R_2)}{U_{и}} 100. \quad (4-4)$$

Определение пульсаций выходного напряжения. При определении оборотных и иных пульсаций собственно ТГ его ось должна строго совпадать с осью двигателя. Рекомендуется устанавливать на двигателе и ТГ муфты по возможности большого диаметра. Для получения равномерного (без колебаний скорости) хода следует выбирать двигатель, по габаритам значительно превышающий габариты ТГ, или иметь сбалансированный маховик. Гармонические составляющие пульсаций ТГ могут быть выявлены с помощью специальных индикаторов, но для получения полной картины удобнее пользоваться осциллографированием.

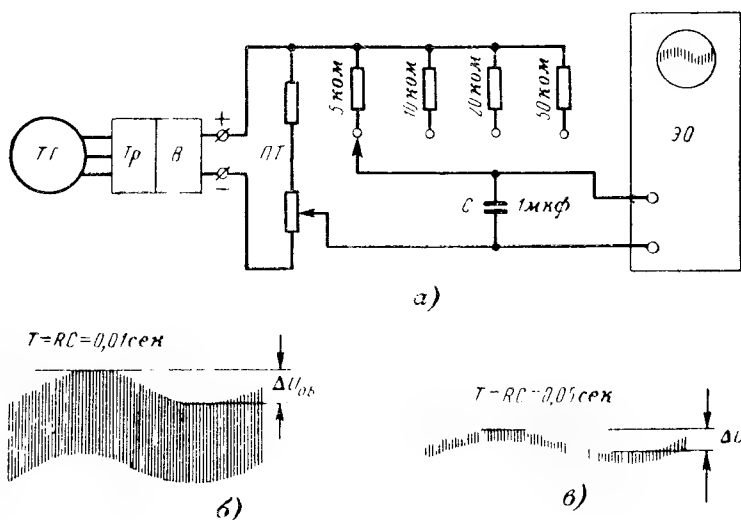


Рис. 4-17. Измерение низкочастотных оборотных пульсаций напряжения тахогенератора.

а — схема; б и в — осциллограммы, снятые при разных постоянных фильтров.

Пульсации напряжения ТГ постоянного тока и многофазного выпрямленного напряжения ТГ переменного тока составляют очень малую величину по отношению к среднему значению напряжения. Поэтому с помощью шлейфового осциллографа они могут быть оценены только дифференциальным методом (рис. 4-16,а). Работа с дифференциальной схемой требует особой осторожности, ибо исчезновение или даже резкое изменение одного из сравниваемых напряжений приводит к перегоранию осциллографического гальванометра. По этой

причине подключать вибратор следует только после проверки отсутствия рассогласования напряжений. При строгой периодичности пульсаций, имеющей место в лабораторных условиях и в установившихся режимах электропривода, форму выходного напряжения удобно наблюдать по электронному осциллографу.

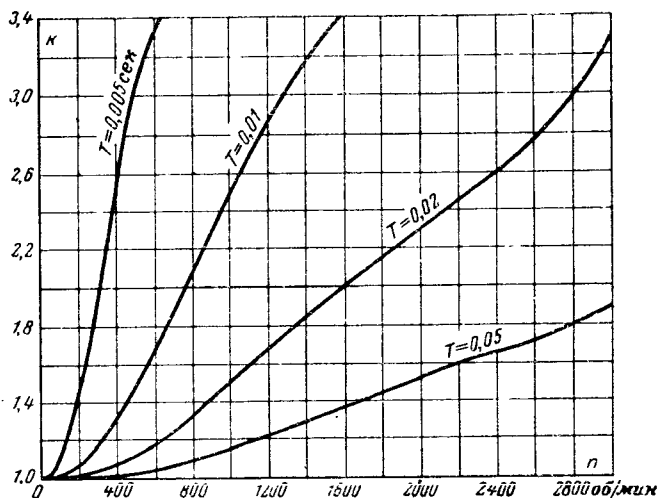


Рис. 4-18. Коэффициенты сглаживания гармонических пульсаций при использовании однозвенных фильтров RC .

Для отделения низкочастотных оборотных пульсаций от зубцовых и иных пульсаций повышенной частоты применяются Γ -образные фильтры RC . Действие фильтра особенно наглядно проявляется при испытаниях ТГ переменного тока.

На рис. 4-17,а показана схема испытаний ТГ переменного тока; ТГ включен через трансформатор Tr и выпрямитель B на потенциометр $ПТ$. Сопротивление потенциометра подбирается равным эксплуатационной нагрузке (500–2000 ом). Напряжение с $ПТ$ снимается через фильтр с набором сопротивлений. В зависимости от положения переключателя постоянная фильтра изменяется от 0,005 до 0,05 сек.

Фильтр сглаживает зубцовые и оборотные пульсации; коэффициент сглаживания ζ определяется выражением

$$\begin{aligned}\zeta &= \frac{\Delta U'}{\Delta U''} = \sqrt{1 + (\omega RC)^2} = \\ &= \sqrt{1 + (2\pi f_{об} T)^2} \approx \sqrt{1 + 40 f_{об}^2 T^2},\end{aligned}\quad (4-5)$$

где $\Delta U'$, $\Delta U''$ — амплитуды гармонических пульсаций до и после фильтра; ω — угловая частота пульсаций; T — постоянная фильтра RC .

Фильтры с небольшими постоянными времени резко снижают зубцовые пульсации повышенной частоты f_3 и мало влияют на амплитуду оборотных пульсаций $\Delta U_{об}$ (рис. 4-17, б, в). Снижение оборотных пульсаций может быть оценено с помощью графика

$$k_{\Phi} = \frac{\Delta U'_{об}}{\Delta U_{об}} = f(f_{об}),$$

приведенного на рис. 4-18.

4-4. Сельсины

Силовые сельсины служат для дистанционной синхронной связи вращающихся или поворачиваемых на конечный угол электроприводов. Передача углового перемещения происходит синхронно, синфазно и без скачков.

Для передачи значительных моментов в промышленности применяются трехфазные сельсины (рис. 4-19), по схеме и конструкции тождественные асинхронным двигателям с фазным ротором. Методика наладки сельсинов в большинстве элементов подобна наладке асинхронных двигателей (см. гл. 3).

Во время наладки применительно к особенностям исследуемого привода производятся специальные измерения.

Измеряются токи $I_{\text{в}}$ в обмотках возбуждения и токи $I_{\text{с}}$ в цепях линии связи. Желательно получить данные измерений при холостом ходе, при различных значениях моментов и скорости.

Сопрягаемые сельсины — датчик и приемник — должны иметь одинаковые характеристики и величины на-

пряжений, питающих их обмотки возбуждения, должны быть равны. При одинаковых характеристиках и отсутствии рассогласования углов ($\gamma_d - \gamma_n = 0$) в цепях связи не будут протекать токи. Если э. д. с. обмоток синхронизации разнятся по величине, но совпадут по фазе, то уравнивающие токи создадут только незначительные электромагнитные моменты.

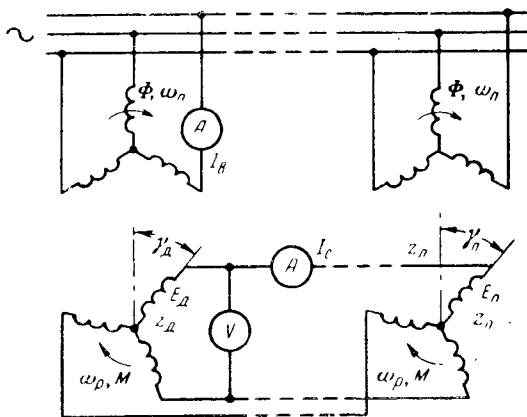


Рис. 4-19. Схема включения силовых сельсиг-
нов.

В общем случае уравнивающие токи определяются отношением

$$I = \frac{\dot{E}_d - \dot{E}_n}{z_d + z_n + z_l} = \frac{\Delta \dot{E}}{z_s}; \quad (4-6)$$

где $\Delta \dot{E}$ — вектор разности фазных э. д. с. (рис. 4-20,а); z_d , z_n , z_l — сопротивления обмоток роторов (датчика, приемника) и линии, приходящиеся на фазу.

Электромагнитные синхронизирующие моменты M связаны с углами рассогласования $\Delta \gamma$ (рис. 4-20,б) зависимостью, близкой к синусоиде. Амплитуда синусоиды зависит от того, вращается ротор сельсина по направлению вращения поля статора ($\omega_n - \omega_p$) или против него ($\omega_n + \omega_p$). Амплитуды M'_m и M''_m обеих полуволн и их фазы определяются величиной относительного скольжения, а следовательно, э. д. с. рассогласования и полным реактансом цепи. Указанное явление приводит

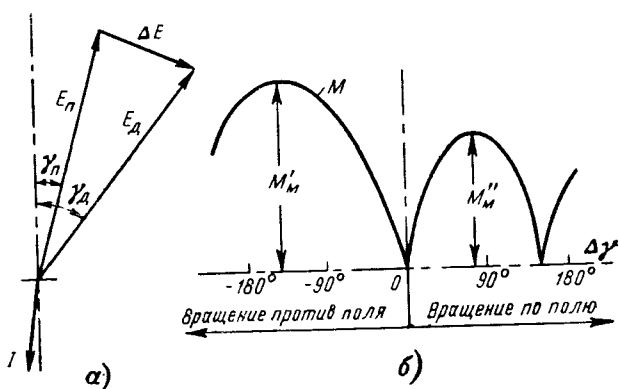


Рис. 4-20. Диаграммы э. д. с. и моментов силовых сельсинов.

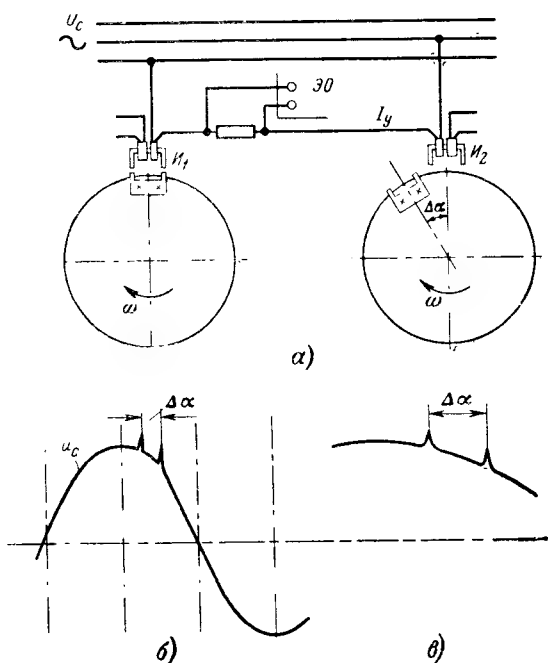


Рис. 4-21. Измерение углов рассогласования вращающихся сельсинов.

к большому различию не только амплитуд, но и угловых периодов моментов синхронизации.

При исследовании синхронизируемых электроприводов в ряде случаев определяются углы рассогласования сельсинов $\gamma_d - \gamma_n$ и строятся векторные диаграммы. Угловое смещение $\Delta\gamma$ можно определить с помощью двух импульсных индукционных датчиков, устанавливаемых на валах вращающихся сельсинов и электронного или шлейфового осциллографа. Примерная схема приспособления дана на рис. 4-21.

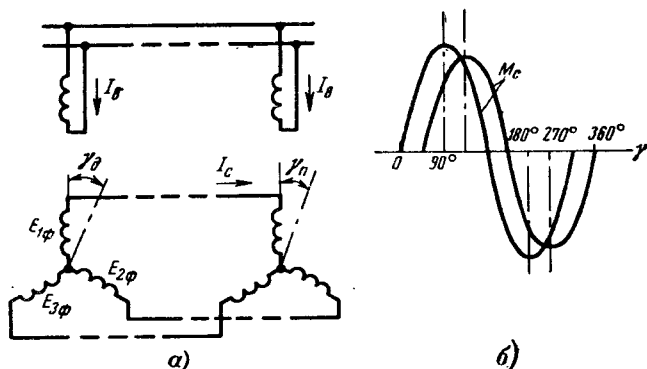


Рис. 4-22. Индикаторный режим работы сельсинов.

При вращении металлических дисков с прорезями (или гетинаксовых дисков со стальными планками) датчики I_1 и I_2 создают импульсные толчки э. д. с., накладываемые на кривую напряжения сети возбуждения или кривую линейного напряжения в цепях линии связи.

Взаимное положение дисков следует отрегулировать таким образом, чтобы при токе $I_y = 0$ импульсы э. д. с. обоих датчиков совпадали. В этом случае, синхронизируя осциллограмму и растягивая ее в желаемых пределах (рис. 4-21, в), можно измерить угол рассогласования сельсинов $\Delta\alpha = \alpha_d - \alpha_n$.

Однофазные контактные и бесконтактные сельсины используются для передачи на расстояние сигнала задания по углу поворота вала. Передача на расстояние угла связана с индикаторным режимом работы сельсинов (рис. 4-22). Вращающий момент в однофазном сельсине создается при взаимодействии синусоидального пульсирующего потока возбуждения и тока ротора, создаваемого наведенными э. д. с. Величины токов в обмотках синхронизации, а следовательно, и моментов вращения пропорциональны косинусу угла поворота ротора.

При наладке указанных сельсинов необходимо убедиться в строгой идентичности сельсина-датчика и сельсина-приемника. Для этой цели следует измерить токи возбуждения I_v и э. д. с. E_ϕ в обмотках каждого сельсина в отдельности. Измерения предварительно следует выполнить при разомкнутых цепях синхронизации и разных углах γ_i поворота роторов. Затем цепи синхронизации замыкаются, ротор одного из сельсинов фиксируется в определенных положениях $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k$ и снимаются кривые синхронизирующего момента M_c (рис. 4-22,б).

Кривые моментов снимаются с помощью рычага с гирями или пружинного силомера. Одновременно снимаются кривые токов в обмотках. В последующем по величинам токов можно оценить величины моментов сопротивлений на валу сельсина приемника и рассчитать статическую угловую погрешность. Необходимо иметь в виду, что отклонение питающего напряжения от синусоиды вносит значительные погрешности. Поэтому следует воздерживаться от применения феррорезонансных стабилизаторов напряжения, насыщающихся автотрансформаторов и иных устройств, искажающих форму э. д. с.; для выправления формы э. д. с. иногда приходится подбирать специальные фильтры.

Погрешность сельсинов-датчиков связана с их геометрической и магнитной несимметрией, но благодаря тщательному изготовлению ее удается свести к небольшой величине, и для сельсинов 1—3 класса нормируемые величины составляют всего $\pm 0,25$ — 1° . Погрешность сельсинов-приемников увеличивается из-за трения в подшипниках, в контактах и иных подвижных связях; для 1—3 класса нормируемые величины составляют $\pm 0,75$ — $2,5^\circ$.

В схемах электроприводов однофазные сельсины широко используются как бесконтактные автотрансформаторы, дающие напряжение, пропорциональное углу поворота. При трансформаторных режимах снимаются характеристики $U=f(\alpha)$ с разными сопротивлениями нагрузки R, L .

Небольшие трехфазные сельсины позволяют суммировать, вычитать, а также умножать и делить угловые величины. Одна из обычных схем с дифференциальным сельсином показана на рис. 4-23.

В приведенной схеме дифференциальным сельсином принято называть сельсин C_2 . Если роторы сельсинов C_1 и C_2 поворачиваются на заданные углы α_1 и α_2 и закрепляются в этих положениях, то свободный ротор сельсина C_3 поворачивается на угол α_3 , равный алгебраической разности углов α_1 и α_2 . Однако в данной схеме свободным можно сделать ротор любого крайнего сельсина.

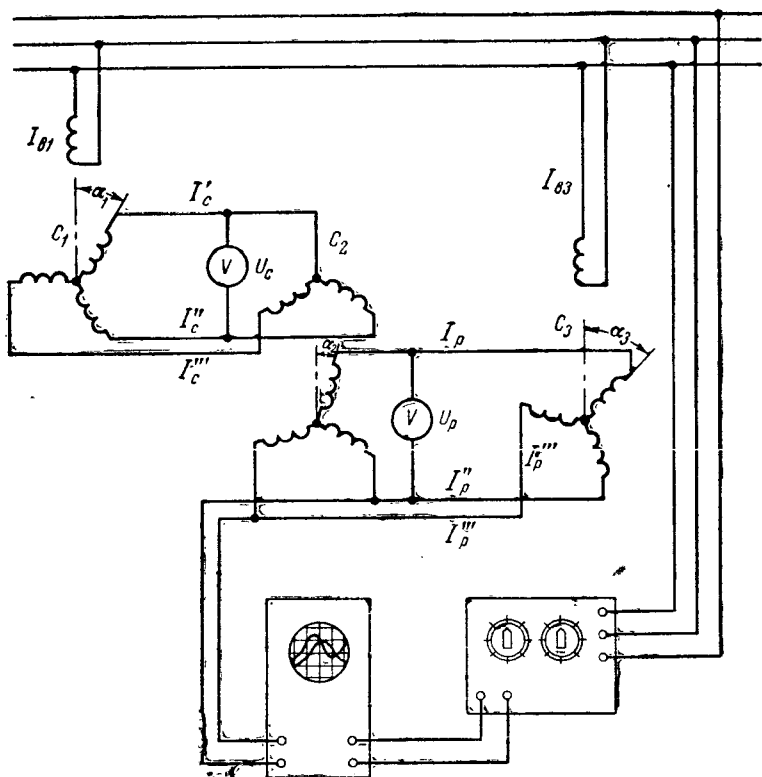


Рис. 4-23. Схема включения дифференциального сельсина.

При наладке сельсинов, работающих в подобных схемах группового включения, следует предварительно оценить симметрию и собственные погрешности каждого сельсина.

Перед включением на рабочее напряжение производится фазировка сельсинов; ее удобно производить с по-

мощью электронного осциллографа или вольтметра малого потребления путем проверки симметрии фазных и линейных напряжений. Рекомендуется также измерять токи в обмотках возбуждения и во всех линиях связи.

У дифференциальных сельсинов приходится снимать семейства характеристик, дающие зависимость э. д. с. на роторе при разных его положениях и при разных э. д. с., поступающих на статор $E_p = f(\alpha_2, U_c)$. Чувствительность сельсинов и угловые погрешности определяются в режимах, близких к рабочим.

Для точного измерения углового смещения э. д. с. рекомендуется использовать осциллограф с горизонтальной разверткой, питаемой от фазорегулятора (рис. 4-23). В данном случае требуется фазорегулятор с внутренним безлюфтовым редуктором и со шкалой в долях градуса. «Усиление по горизонтали» подбирается с таким расчетом, чтобы вероятная угловая погрешность ($\pm 0,25—2,5^\circ$) составляла примерно одну треть (4—6 см) ширины экрана осциллографа.

Приведенные примеры проверки сельсинов составляют, естественно, малую часть от возможных приемов испытаний. В каждом конкретном случае наладчик должен ознакомиться с принципом работы сельсина и требованиями, предъявляемыми схемой электропривода, а затем подобрать методы измерений.

4-5. Исполнительные микродвигатели

Микродвигатели, мощностью от малых долей ватта до 500 вт, все более широко применяемые в схемах телемеханики, автоматики, вычислительных устройств, составляют специальную сложную область электротехники [Л. 20, 21, 23]. Даже краткое изложение методики их наладки может быть представлено только в отдельной работе. Вместе с тем наладчики электроприводов часто сталкиваются с необходимостью проверки работоспособности микродвигателей, а в ряде случаев — проверки возможности выполнения определенных функциональных операций. Ниже приводится рекомендуемый подход к вопросу.

Проверка микродвигателя должна начинаться с определения его типа и конструкции. В литературе [Л. 20, 23] принято подразделение микродвигателей на коллекторные, асинхронные и синхронные. Выбор исполнительного двигателя определяется родом автоматического

устройства и условиями его работы. В качестве машин, регулируемых по скорости, по моменту и перемещению, служат коллекторные и асинхронные двигатели. Коллекторные двигатели могут быть постоянного или переменного тока, а также универсальными. Асинхронные двигатели изготавливаются с короткозамкнутым, с полым немагнитным и с полым магнитным роторами. Синхронные двигатели, используемые для вращения механизмов с постоянной скоростью, по принципу действия называются реактивными, гистерезисными или двигателями с активным ротором.

Во время наладки микродвигателей (МД) выполняются работы общего характера, изложенные в гл. 1: производится внешний осмотр, измеряются сопротивления

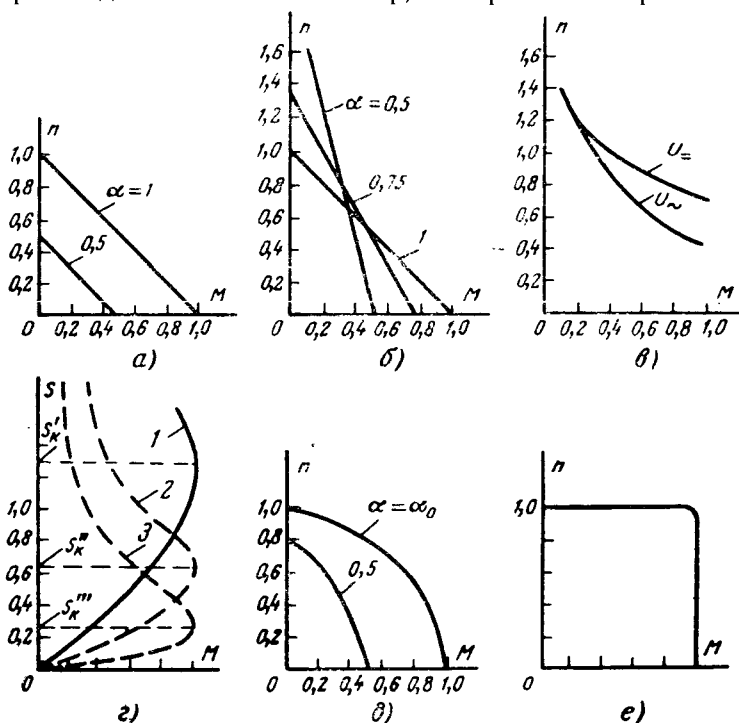


Рис. 4-24. Внешние характеристики микродвигателей.

а — двигателя постоянного тока с якорным управлением; б — то же, но с полюсным управлением; в — универсального коллекторного двигателя, приспособленного для работы на постоянном и переменном токе; г — асинхронного двигателя, работающего при скоростях выше синхронной; д — асинхронного двигателя при амплитудно-фазовом управлении; е — гистерезисного двигателя; α — коэффициент сигнала.

ния изоляции и сопротивления постоянному току. Микродвигатели проворачиваются вручную, и проверяется свобода их хода, причем во многих случаях совместно с механизмом.

Перед подачей рабочего напряжения на МД необходимо проверить, допускается ли его длительное включение; нормируемый режим работы зависит от тока МД и схемы его питания. Следует иметь в виду, что вследствие малого габарита МД его постоянная нагрева очень мала и в случае больших токов он может сгореть за доли секунды. Поэтому надежность установки зависит от правильного выбора быстродействующей защиты, осуществляемой обычно плавкими вставками.

Вместе с тем во многих схемах обмотки МД подключаются к источникам питания без каких-либо индивидуальных средств защиты. Это принято в установках, на которых поврежденный микродвигатель может быть легко заменен, а устройства защиты по стоимости и габаритам соизмеримы с микродвигателями. От устройств защиты иногда воздерживаются по причине вероятной потери контакта и, следовательно, снижения готовности электроустановки.

Во время работы МД измеряются напряжения на обмотках и токи во всех цепях. При измерениях следует пользоваться детекторными многопредельными приборами с чувствительными гальванометрами, поскольку потребление обычных электромагнитных и даже магнитоэлектрических приборов соизмеримо с потреблением обмоток МД.

Токи и напряжения в цепях МД часто имеют прерывистый характер или сложную форму. При этом показания измерительных приборов могут служить только для сравнительной оценки разных режимов; для получения истинной картины физических процессов необходимо приспособить электронные или шлейфовые осциллографы.

Соответствие каталожным данным и индивидуальные свойства большинства МД определяются механиче-

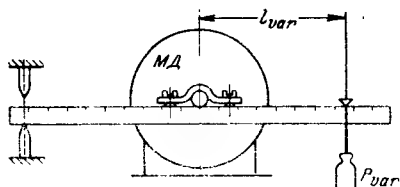


Рис. 4-25. Измерение электромагнитного момента и момента сопротивления привода микродвигателя.

У МД многих типов токи и напряжения содержат пульсации, связанные с зубчатым строением ротора (или якоря). Эти пульсации имеют частоту, пропорциональную скорости ротора и могут использоваться для измерения скорости.

Во время наладки следует проверить, в какой степени исполнительные микродвигатели отвечают различным требованиям специального характера. К таким требованиям относятся: а) отсутствие радиопомех, б) статическая устойчивость или отсутствие автоколебаний токов и скорости, в) отсутствие самохода при снятии сигнала управления.

В ряде случаев МД должны обладать особым быстродействием и следующими специальными характеристиками: а) линейной зависимостью скорости вращения от величины сигнала управления, б) высоким коэффициентом усиления по напряжению, току или мощности (сопоставляется изменение мощности на валу с изменением мощности управляющего сигнала $K_y = \Delta P_d / \Delta P_y$), в) линейностью механических характеристик в заданном диапазоне изменения скоростей $\Delta M / \Delta n = \text{const}$.

Методика проверки названных характеристик связана с детальным изучением теории микромашин и их исследованием на специальных лабораторных стендах [Л. 21, 23].

Глава пятая

ПОСТОЯННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И МЕТОДЫ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

5-1. Постоянные электрических машин, определяющие работу электропривода

При наладке сложных электроприводов для анализа переходных процессов в ряде случаев необходимо произвести поверочные расчеты на основании уточненных данных маховых моментов, электромеханических постоянных, электромагнитных постоянных времени и других величин, характеризующих электрические машины. Под постоянными электрических машин понимают зависящие от конструкции нерегулируемые величины, определяющие свойства электропривода и входящие в общепринятые расчетные зависимости.

1. Маховой момент GD^2 определяется произведением веса вращающейся части (ротора, якоря) машины на квадрат приведенного радиуса инерции и указывается обычно в килограммометрах; для крупных машин — в тоннометрах; для микромашин — граммосантиметрах.

Через маховой момент может быть выражен момент инерции

$$J = \frac{GD^2}{g}. \quad (5-1)$$

2. Электромагнитная постоянная времени T_a любой электрической цепи машины даст представление о ее динамических свойствах.

В общем случае

$$T_a = \frac{L}{R}, \text{ сек}; \quad (5-2)$$

$$L = \frac{d\Phi}{dF} \omega^2; \quad T_a = \frac{\omega^2}{R} \frac{d\Phi}{dF}, \quad (5-3)$$

где L — индуктивность цепи, $гн$;

Φ, F — магнитный поток и н. с., связанные с витками обмотки;

R — активное сопротивление, $ом$;

ω — число витков обмотки.

Величина $d\Phi/dF$ равна тангенсу угла наклона касательной к кривой намагничивания $\Phi = f(F)$ в рабочей точке.

При расчетах схем электроприводов постоянного тока наиболее часто пользуются электромагнитной постоянной обмотки возбуждения $T_{a.в}$ и якоря $T_{a.я}$. Величину $T_{a.в}$ удобно оценивать после преобразования

$$\frac{\omega^2}{R} = \frac{\omega^2}{\rho \frac{l_{cp} \omega}{q}} \frac{l_{cp}}{l_{cp}} = k \frac{V}{\rho l_{cp}^2}; \quad T_{a.в} = k \frac{V}{\rho l_{cp}^2} \frac{d\Phi}{dF}, \quad (5-4)$$

где ρ, l_{cp}, q — удельное сопротивление, средняя длина витка и поперечное сечение провода обмотки;

k — коэффициент заполнения;

V — объем обмотки.

Из полученной зависимости видно, что электромагнитная постоянная обмотки возбуждения прямо пропорциональна ее объему, обратно пропорциональна удельному сопротивлению провода и квадрату средней дли-

ны витка. Приведенное отношение, в частности, говорит о том, что при разделении обмотки возбуждения на части (например, пополам) и соединении их параллельно электромагнитная постоянная не изменяется.

Постоянная $T_{э.в}$ цепи возбуждения в целом зависит от сопротивления регулирующего реостата R_d

$$T_{э.в} = \frac{w^2}{R_s + R_x} \frac{d\Phi}{dF}. \quad (5-5)$$

При контрольных расчетах налаживаемых генераторов и возбуждителей вместо кривой намагничивания удобно пользоваться характеристикой холостого хода $E = f(F)$.

Поскольку э. д. с.

$$E = C_e n \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5-6)$$

$$T_{э.в} = \frac{w^2}{RC_e n} \frac{E dt}{dF} = \frac{w^2}{RC_e n} \frac{de}{dF}. \quad (5-7)$$

Электромагнитную постоянную якоря $T_{я}$ с точностью до 10—20% можно рассчитать по табличным данным машины. Согласно формуле Уманского индуктивное сопротивление якоря определяется выражением

$$L_{я} = \beta \frac{U_n}{I_n} \frac{1}{p w_{я.н}}. \quad (5-8)$$

Для некомпенсированных машин $\beta = 0,6$; у средних и крупных компенсированных машин коэффициент пропорциональности $\beta = 0,15 \div 0,25$. Таким образом,

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} = \frac{\beta R_{я}}{R_{я} p} \frac{\pi n}{30} \approx \frac{10\beta}{p R_{я} n}, \quad (5-9)$$

где $R_{я}$ — сопротивление якоря в относительных величинах;

p — число пар полюсов.

Электромагнитная постоянная времени $T_{э}$ электрических машин с несколькими обмотками возбуждения определяется путем суммирования постоянных T_i отдельных обмоток. Это положение справедливо для обычных генераторов и для электромашинных усилителей. Пользуясь приведенными выше зависимостями (5-5) и (5-7),

общую постоянную T_0 ЭМУ поперечного поля можно найти из уравнений

$$T_0 = \frac{1}{C_{\text{н}}} \sum \frac{w_i^2}{r_i + r_{\text{д}i}} \frac{de_i}{dt_i} = T_{11} + T_2 + \dots + T_{\text{к.о}}, \quad (5-10)$$

где w_i — числа витков компенсационной обмотки и обмоток управления ЭМУ;

$r_i, r_{\text{д}i}$ — сопротивление обмоток управления и добавочных сопротивлений к ним;

de_i/dF_i — тангенсы углов наклона кривых намагничивания, снятых при возбуждении ЭМУ от данных обмоток.

3. Электромеханическая постоянная времени T_m . По величине постоянная T_m соответствует времени разгона двигателя до скорости холостого хода ω_0 при неизменном избыточном моменте, равном моменту короткого замыкания M_k :

$$T_m = J \frac{\omega_0}{M_k}. \quad (5-11)$$

В устойчивой части механических характеристик T_m сохраняет физический смысл для двигателей всех типов.

При расчете переходных процессов электроприводов постоянного тока пользуются выражением

$$T_m = \frac{GD^2 R_{\text{я}}}{375 C_e C_M \Phi_{\text{д}}^2}, \quad (5-12)$$

где $R_{\text{я}}$ — полное сопротивление якорной цепи, *ом*, включающее сопротивления якоря — $r_{\text{я}}$, дополнительных полюсов — $r_{\text{д.п.}}$, компенсационной обмотки — $r_{\text{к.о.}}$, а также сопротивление источников питания — $r_{\text{и.п.}}$. В системах Г—Д величина $r_{\text{и.п.}}$ складывается из активных сопротивлений якорной цепи генератора, ошиновки, кабелей и аппаратуры. В системах с управляемыми преобразователями $r_{\text{и.п.}}$ определяется приведенным активным сопротивлением трансформатора, реактора, дуги или выпрямляющего перехода и т. д. В тех случаях, когда напряжение на якоре двигателя поддерживается неизменным, можно вывести понятие электромеханической постоянной собственно двигателя $T_{\text{м.д.}}$.

Коэффициент $C_e = pN/60a$ определяется конструкцией обмотки машины. Здесь p — число пар полюсов, N — число витков (стержней) якоря на пару полюсов, a —

число параллельных ветвей. Коэффициент C_e зависит от системы единиц.

Постоянная T_m обратно пропорциональна квадрату магнитного потока двигателя Φ_d и поэтому резко возрастает при уменьшении тока возбуждения. Например, при диапазоне регулирования скорости, равном трем (в системах с неизменным напряжением якоря), постоянная T_m изменяется в 9 раз.

5-2. Определение маховых моментов

Экспериментальное определение маховых моментов принято производить с помощью опыта свободного выбега [Л. 2, 7], а у небольших электрических машин также методом маятника или разгона под действием падающего груза.

Современные системы авторегулирования обеспечивают поддержание постоянства тока или момента при разгоне электродвигателей; при таких режимах маховой момент удобно находить из опыта разгона.

Рассмотрим предварительно определение махового момента путем естественного торможения привода с момента отключения двигателя от сети.

Для режима торможения справедливо соотношение

$$M + M_c = M_d,$$

где M — электромагнитный момент двигателя;

M_c — статический момент нагрузки;

M_d — динамический момент, возникающий при изменении скорости.

При выбеге $M=0$ и тогда

$$M_c = M_d = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}; \quad (5-13)$$

здесь

$$M_c \text{ — в кГм, } \frac{dn}{dt} \text{ — в м/сек}^2.$$

Во время опыта свободного выбега должна быть получена зависимость $n=f(t)$, приведенная на рис. 5-1. При затяжном выбеге больших двигателей характери-

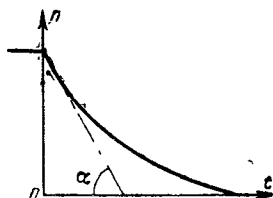


Рис. 5-1. Изменение скорости при свободном выбеге.

стика скорости строится с помощью тахометра и секундомера, а в случаях быстрого торможения — путем осциллографирования.

Статический момент в начале выбега можно рассчитать по данным измерений потребляемой мощности P_c и скорости вращения n_0 при холостом ходе

$$M_c = 975 \frac{P_c}{n_0}.$$

Соответствующее значение dn/dt находится как тангенс угла наклона кривой скорости в начальный момент. Методика измерений и расчетов определяется типом испытуемого двигателя.

У двигателей постоянного тока мощность P_0 , потребляемая при холостом ходе, складывается из механических потерь $p_{мех}$, потерь в меди p_m , в стали якоря $p_{ж}$ и в щетках $p_{щ}$

$$P_0 = p_{мех} + p_m + p_{ж} + p_{щ}. \quad (5-14)$$

В начальный момент выбега статический момент сопротивления, так же как при холостом ходе, включает потери на перемагничивание стали якоря. Тогда

$$P_c = p_{мех} + p_{ж} = P_0 - p_m - p_{щ} = P_0 - I_0^2 R_{я} - 2I_0 \Delta U_{щ}; \quad (5-15)$$

$$M_c = 975 \frac{P_c}{n_0} = 975 \frac{P_0 - I_0^2 R_{я} - 2I_0 \Delta U_{щ}}{n_0}. \quad (5-16)$$

Пример. Требуется определить маховой момент привода с двигателем постоянного тока, имеющим скорость $n=1000$ об/мин.

Решение. Разгоняем двигатель до 1000 об/мин и при установившемся холостом ходе привода измеряем потребляемую из сети мощность P_0 и ток якоря I_0 . Пусть $P_0=1,8$ квт; $I_0=8,2$ а.

На якорь двигателя подключаем (через добавочное сопротивление) осциллографический гальванометр. Замыкаем цепь вибратора, а затем отключаем якорь двигателя от сети. По осциллограмме с помощью касательной находим, что в начальный момент

$$\frac{dn}{dt} \approx \frac{\Delta n}{\Delta t} = 22 \frac{\text{об/мин}}{\text{сек}}.$$

Путем измерений определяем полное сопротивление якорной цепи (кроме щеток) за ваттметром. Пусть $R_{я}=1,9$ ом.

Рассчитываем искомые величины

$$p_m = I_0^2 R_{я} = 8,2^2 \cdot 1,9 = 127,5 \text{ вт (0,13 квт);}$$

$$p_{щ} = 2I_0 \Delta U_{щ} = 2 \cdot 8,2 \cdot 1,6 = 26,3 \text{ вт (0,03 квт);}$$

далее по (5-16)

$$M_c = 975 \frac{P_0 - p_m - p_{щ}}{n_0} = 975 \frac{1,8 - 0,13 - 0,03}{1000} = 1,62 \text{ кг}\cdot\text{м},$$

откуда

$$GD^2 = \frac{375 M_c}{dn/dt} = \frac{375 \cdot 1,62}{22} = 22,7 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

У асинхронных двигателей мощность P_0 , потребляемая при холостом ходе, включает следующие потери: $P_0 = p_{\text{мех}} + p_{\text{м}} + p_{\text{ж}}$.

В начальный момент выбега при отключении статора от сети магнитный поток исчезает не мгновенно; постепенное снижение потока определяется успокоительным действием короткозамкнутого ротора и магнитопровода.

Поэтому $P_c = p_{\text{мех}} + p_{\text{ж}} + P_0 - p_{\text{м}}$.

Ориентируясь на данные расчетов, можно принять, что потери в меди короткозамкнутого ротора (при холостом ходе) малы по сравнению с потерями в меди статора. Тогда $P_c = P_0 - 3I_0^2 R_{\text{ф.ст}}$, где $R_{\text{ф.ст}}$ — сопротивление одной фазы статора.

Далее расчет ведется по приведенным выше формулам.

При определении махового момента асинхронного двигателя с фазным ротором опыт выбега может быть произведен путем размыкания цепей ротора. В этом случае потери в стали не будут участвовать в создании статического момента сопротивления и последний определяется только механическими потерями $P_c = p_{\text{мех}}$.

Если измерить мощность P'_0 , потребляемую в начальный момент при размыкании статора, то она будет определяться потерями в стали и потерями в меди статора. Однако потери в меди статора при разомкнутом роторе $p'_{\text{м.ст}}$ примерно равны потерям в меди машины при холостом ходе.

Поэтому $P_c \approx p_{\text{мех}} = P_0 - p_{\text{м}} - (P'_0 - p'_{\text{м.ст}}) \approx P_0 - p'_0$.

Таким образом, мощность P_c , необходимая для расчета, может быть определена, как разность мощности P_0 , потребляемой при холостом ходе, и мощности P'_0 , потребляемой в начальный момент после размыкания ротора.

У синхронных двигателей маховой момент определяется описанным выше методом из данных опыта свободного выбега при отключении статора от сети. Опыт холостого хода проводится при коэффициенте мощности, равном единице, чтобы в начальный момент выбега магнитный поток двигателя, а следовательно, и потери в стали можно было считать неизменными.

Во время холостого хода $P_0 = p_{\text{мех}} + p_{\text{м}} + p_{\text{ж}} + p_{\text{возб}}$, где $p_{\text{возб}}$ — потери в возбудителе и в обмотках возбуждения. По сравнению с холостым ходом при выбеге в создании тормозного момента не участвуют только

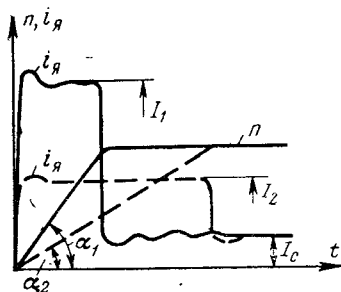
потери в меди обмотки статора. Поэтому для синхронных двигателей, как и для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, можно записать:

$$P_c^* = P_0 - p_m = P_0 - 3I_0^2 R_{ст}.$$

При разгоне двигателей постоянного тока имеют место соотношения

$$M = M_c + M_d; C\Phi I_a = M_c + \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}.$$

В случае автоматического режима разгона с постоянными параметрами Φ и I получим:



$$C\Phi I_a = \text{const}; \frac{dn}{dt} = \text{const}.$$

Разгон при неизменном токе I_1 иллюстрируется осциллограммами, приведенными на рис. 5-2 [см. кривые I_a , $n=f(t)$ нанесенные сплошными линиями]:

$$C\Phi I_1 - M_c = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} = \frac{GD^2}{375} \text{tg } \alpha_1;$$

Рис. 5-2. Осциллограммы разгона двигателя при постоянном токе якоря.

$$GD^2 \text{tg } \alpha_1 = 375 (C\Phi I_1 - M_c).$$

При разгоне с неизменным током I_2 (см. пунктирные кривые на рис. 5-2)

$$GD^2 \text{tg } \alpha_2 = 375 (C\Phi I_2 - M_c).$$

После преобразований найдем:

$$GD^2 = \frac{375}{\text{tg } \alpha_1 - \text{tg } \alpha_2} (C\Phi I_1 - C\Phi I_2). \quad (5-17)$$

Из формулы (5-17) следует, что для определения махового момента привода требуется снять две осциллограммы разгона при разных пусковых токах. В этом случае нет необходимости находить статический момент нагрузки.

Величины $C\Phi I_1 = M_1$ и $C\Phi I_2 = M_2$ легко найти по номинальным данным машины.

При разгоне с номинальным током возбуждения

$$M_1 = M_n \frac{C\Phi}{C\Phi_n} \frac{I_1}{I_n} = M_n \frac{I_1}{I_n}; M_2 = M_n \frac{I_2}{I_n},$$

где

$$M_n = 975 \frac{P_n}{n_n}.$$

После преобразований получим:

$$GD^2 = 0,36 \cdot 10^6 \frac{P_n}{I_n n_n} \frac{I_1 - I_2}{\operatorname{tg} \alpha_1 - \operatorname{tg} \alpha_2}. \quad (5-18)$$

Двигатели переменного тока, включаемые на напряжение сети, имеют статические характеристики приведенные на рис. 5-3. С достаточной точностью можно принять, что в динамическом состоянии в начале разгона момент двигателя будет сохранять неизменную величину (подобно участкам $a-b$ и $a'-b'$ на рис. 5-3).

Определяя моменты разгона по каталожным данным [Л. 15], следует иметь в виду, что они соответствуют статическим режимам (т. е. условиям неизменной скорости); при интенсивном разгоне ($t_p < 0,2$ сек) фактические моменты на 5—15% ниже каталожных значений.

Маховой момент небольших двигателей и редукторов приближенно может быть определен без электрических измерений с помощью маятника (рис. 5-4) или падающего груза (рис. 5-5). Первый способ состоит в том, что к валу двигателя с помощью легкого рычага длиной L прикрепляют груз Q и сообщают ему колебательные движения маятника. Зная вес маятника, длину рычага и период колебаний T , можно определить маховой момент ротора машины

$$(GD^2)_{\text{рот}} = \frac{g}{\pi^2} QLT^2 - 4LQ \approx QL(T^2 - 4L), \quad (5-19)$$

где $g = 9,81$ м/сек² — ускорение силы тяжести.

Этот способ применим в тех случаях, когда статический момент проворачивания ротора очень мал.

При проведении опыта длину маятника L следует выбирать небольшой, равной примерно диаметру машины. Маховой момент маятника не должен превышать половины махового момента самого ротора в связи с тем, что момент вращения, создаваемый маятником, пропорционален его длине в первой степени, а маховой момент маятника — квадрату длины.

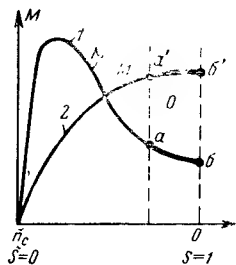


Рис. 5-3. Статические характеристики моментов асинхронного двигателя.

1 — двигатель с короткозамкнутым ротором; 2 — двигатель с фазным ротором при введенном реостате.

Для испытаний с помощью падающего груза на вал двигателя или на шкив наматывают киперную ленту или гибкий шнур (рис. 5-5). К свободному концу шнура прикрепляют груз Q ; если двигатель установлен на полу, то шнур может быть переброшен через блок. Опыт состоит в том, что грузу Q дают возможность свободно падать с высоты H и разворачивать при этом ротор ма-

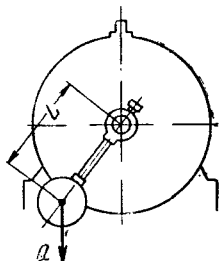


Рис. 5-4. Измерение махового момента косвенным методом с помощью маятника.

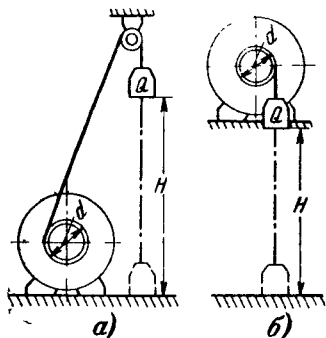


Рис. 5-5. Измерение махового момента косвенным методом с помощью падающего груза. Установка двигателя на полу (а) и на высоте (б).

шины. Определяют величину минимального груза Q_0 , который преодолевает момент трения и проворачивает ротор. Величиной вентиляционных потерь пренебрегают, считая их незначительными.

Избыточный груз $Q_{изб} = Q - Q_0$ создает равномерно ускоренное движение. Измерив с помощью ручного секундомера время падений груза t_1 , можно рассчитать величину $(GD^2)_{рот}$ по формуле

$$(GD^2)_{рот} = Qd^2 \left(\frac{gt_1^2}{2H} - 1 \right), \quad (5-20)$$

где d — диаметр шкива, м;

H — высота падения груза, м.

Пример. Требуется определить маховой момент ротора асинхронного двигателя типа АОЛ 52-6.

На шкив диаметром 120 мм наматывается киперная лента; выбран груз $Q = 2$ кг. Согласно опыту протягивающий груз очень мал ($Q_0 = 40$ г), и поэтому можно принять $Q_{изб} \approx Q$.

С высоты $H = 2,2$ м груз Q падал 2,2 сек.

Находим маховой момент ротора

$$(GD^2)_{рот} = 2 \cdot 0,12^2 \left(\frac{9,81 \cdot 2,2^2}{2 \cdot 2,2} - 1 \right) = 0,28 \text{ кгм}.$$

Маховой момент якоря крупной машины с точностью до 10—12% может быть определен аналитически

$$GD^2 = 0,43 G_{я} D_{я}^2, \text{ м} \cdot \text{м}^2, \quad (5-21)$$

где $G_{я}$ — вес якоря, т;

$D_{я}$ — наружный диаметр якоря, м.

5-3. Экспериментальное определение постоянных времени, индуктивности и емкости электрических машин

Электромагнитная постоянная времени цепи возбуждения определяется по осциллограммам нарастания или спада тока. В первом случае (рис. 5-6, а) обмотка возбуждения $ОВ$ (или цепь возбуждения с добавочными сопротивлениями r_d) включается на постоянное напряжение сети; во втором случае (рис. 5-6, б) $ОВ$ закорачивается. Иногда для оценки режима работы электропривода требуется получить картину изменения напряжения на $ОВ$ (рис. 5-6, в) в момент гашения поля на разрядное сопротивление R_p .

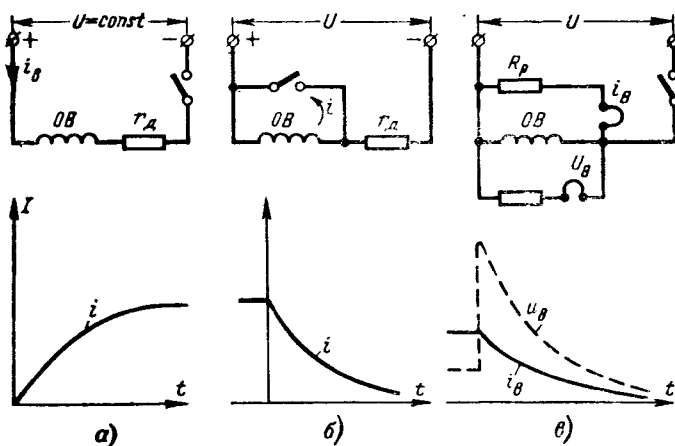


Рис. 5-6. Определение постоянных времени цепей возбуждения путем осциллографирования.

а — включение на постоянное напряжение сети; б — закорачивание обмотки возбуждения; в — гашение поля на разрядное сопротивление.

Указанным контурам соответствуют различные электромагнитные постоянные. По (5-2)

$$T_a = \frac{L_{0,в}}{R_{0,в} + r_d}; T_b = \frac{L_{0,в}}{R_{0,в}} = T_z; T_v = \frac{L_{0,в}}{R_{0,в} + R_p}. \quad (5-22)$$

Характеристика $I = f(t)$ близка к экспоненте (5-7)

$$I = \frac{U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right) = I_{уст} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right). \quad (5-23)$$

Графически значение T_a определяется как отрезок времени, соответствующий ординате кривой тока, равной $0,63 I_{уст}$. Теоретически ток I достигает установившегося значения $I_{уст}$ только при $t = \infty$; практически можно принять, что за время

$$t = 4T_a; I = 0,98 I_{уст} \approx I_{уст}.$$

Постоянная времени T_a в процессе нарастания тока остается неизменной только в тех случаях, когда коэффициент самоиндукции не изменяется. Это имеет место

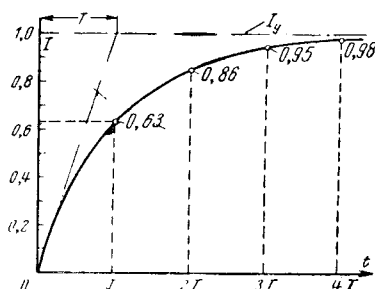


Рис. 5-7. Характеристика нарастания тока в обмотке двигателя при включении на постоянное напряжение.

при совершенно ненасыщенной или полностью насыщенной магнитной системе. По мере насыщения постоянная T_a уменьшается.

У электрических машин одинаковых исполнений значения T_a тем больше, чем больше габарит машины. Обмотки возбуждения крупных генераторов имеют постоянные $T_a = 1 \div 4$ сек. У двигателей с широким регулированием скорости вращения за счет изменения

возбуждения постоянные T_a больше, чем у нерегулируемых двигателей таких же мощностей.

У генераторов постоянного тока и синхронных генераторов для определения электромагнитных постоянных вместо осциллограмм тока возбуждения могут быть сняты осциллограммы э. д. с. $e = f(t)$ (при $n = \text{const}$). Хотя величина потокосцеплений Φ несколько отличается от потока создающего э. д. с., но постоянные времени практически одинаковы. Интересно сопоставить величины T_a , найденные с помощью осциллограмм, и постоянные, рассчитанные по кривым намагничивания для разного состояния насыщения машины. Наиболее удобной является уточненная зависимость (5-5)

$$T_a = \frac{2p\omega^2}{R} \frac{d\Phi}{dF} K_s \cdot 10^{-8} \text{ сек}, \quad (5-24)$$

где p — число пар полюсов;

K_s — коэффициент рассеяния.

Величины $\left[\frac{d\Phi}{dF} \right]$ находятся по тангенсам углов наклона касательных в исследуемых точках кривой намагничивания или из отношения отрезков

$$\left[\frac{d\Phi}{dt} \right] \approx \frac{\Delta\Phi_i}{\Delta F_i}.$$

Электромагнитная постоянная якоря $T_{\text{я}}$ и индуктивность L обмоток якорей определяются по осциллограмме нарастания тока в неподвижном

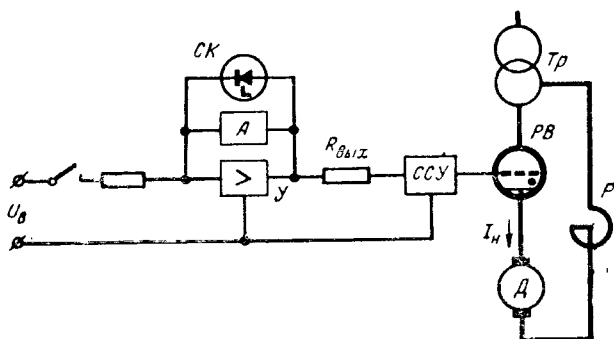


Рис. 5-8. Схема безынерционного управления, собранная для определения постоянных времени якорной цепи.

якорю при подключении его к источнику постоянного тока (рис. 5-7).

В общем случае

$$U = L \frac{dI}{dt} + IR,$$

откуда

$$L = \frac{U - IR}{\frac{dI}{dt}}.$$

Определив по осциллограмме для ряда значений тока I величины dI/dt , можно построить кривую $L = f(I)$.

При исследовании электроприводов обычно требуется знать постоянную T_0 не собственно двигателя, а всей якорной цепи. В системах с нонными или тиристорными

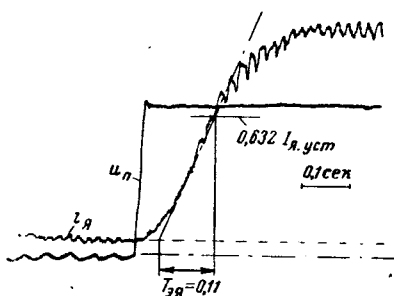
преобразователями искомая постоянная может быть найдена по кривой нарастания тока в разомкнутой системе регулирования (при заторможенном невозбужденном двигателе). С этой целью на вход системы подается постоянный сигнал $U_{\text{в}}$ (рис. 5-8). Регулятор $У$ и система сеточного управления $ССУ$ обеспечивают практически безынерционное открывание преобразователя $РВ$. С момента включения ток $I_{\text{я}}$ возрастает по экспоненте и постоянная якорной цепи $T_{\text{э.я}}$ определяется на уровне ординаты, равной $0,63I_{\text{я.уст}}$. На рис. 5-9 приведены осциллограммы, иллюстрирующие данный опыт.

В практике наладочных работ постоянные якорной цепи определяются также из опыта постепенного линейного подъема анодного напряжения преобразователя.

В этом случае постоянная $T_{\text{э.я}}$ находится по смещению кривой нарастания тока во времени (см. осциллограмму на рис. 5-10). Линейное нарастание напряжения $U_{\text{п}}$ создается интегральным регулятором $У$ (рис. 5-8) при установке конденсатора вместо сопротивления (см. элемент A). Для ограничения величины сигнала применяется пробивной стабилизатор $СК$.

Параметры электрических машин, необходимые для анализа и наладки электроприводов, удобно определять с помощью номограмм, разработанных В. Д. Пышкало, Л. В. Акимовым, О. А. Ор-

Рис. 5-9. Осциллограмма изменения тока в якорной цепи ионного электропривода при мгновенном открывании преобразователя.



лом, В. П. Шамраем (см. журн. «Электротехника», 1963, № 12; 1964, № 10; 1966, № 7; 1967, № 8). Исходные величины находятся путем осциллографирования режима разгона при холостом ходе или при неизменной нагрузке $M_{\text{с}} = \text{const}$. Для проведения данного опыта в схеме электропривода отключаются все обратные связи, размыкается цепь главного тока, двигатель возбуждается до величины, соответствующей контролируемому режиму. Напряжение источника питания поднимается до величины $U_{\text{п}}$ (порядка 10—15% $U_{\text{н}}$), при которой толчок тока будет лежать в пределах допустимой величины.

Примерная осциллограмма разгона представлена на рис. 5-11,а. При описываемой методике достаточно рассмотреть условия первого броска пускового тока, поэтому в примере дана осциллограмма без обычных затухающих колебаний. В момент включения двигателя питающее напряжение резко падает (от $U_{\text{п}}$ до $U_{\text{но}}$), а ток $I_{\text{я}}$ начинает возрастать, двигатель разгоняется, увеличивается его э. д. с., ток $I_{\text{я}}$ проходит через максимальное значение $I_{\text{м}}$ и затем при установившейся скорости достигает величины $I_{\text{уст}}$.

Предложенные номограммы (рис. 5-11, б, в) рассчитаны по уравнениям переходных процессов и построены в относительных единицах. За базисную величину времени принята электромагнитная постоянная $T_э$; при этом время $\tau = t/T_э$. По вертикали отложена относительная электромеханическая постоянная привода $\beta = T_м/T_э$.

Постоянная $T_э$ находится одним из описанных выше способов; электромеханическая постоянная $T_м$ определяется по номограмме путем подстановки времени $t_м$. Номограмма позволяет найти также

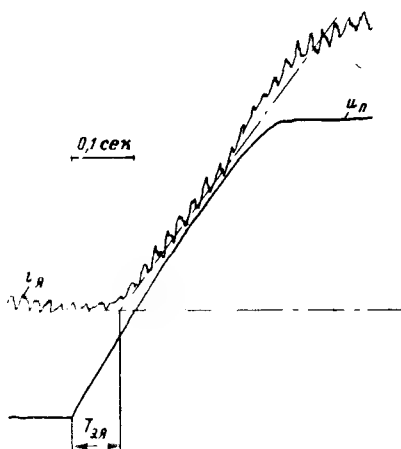


Рис. 5-10. Осциллограмма изменения тока якорной цепи при линейном подъеме анодного напряжения преобразователя.

сопротивления $R_я$, $L_я$ и маховой момент GD^2 . Порядок работы с номограммой следующий: из опыта (рис. 5-11, а) находят отрезок времени $t'_м = t_м - t_1$ и рассчитывают его относительное значение

$$\tau_м = \frac{t_м - t_1}{T_э}.$$

На оси α откладывают величину $Oa = \tau_м$, находят точки a и b (см. направление стрелок ab и $b\alpha$). Величина $OB = \beta = \frac{T_м}{T_э}$, откуда $T_м = \beta T_э$.

Затем находят точку z и на оси γ отрезок Od . Ось γ представляет собой зависимость

$$\gamma = Od = \frac{I_м - I_{уст}}{E_н - I_{уст}R}. \quad (5-25)$$

Из этого уравнения определяется активное сопротивление схемы главных цепей

$$R = \frac{E_{\pi}}{I_{уст}} - \frac{1}{\gamma} \left(\frac{I_{\text{м}}}{I_{уст}} - 1 \right). \quad (5-26)$$

Сопротивление источника питания

$$R_{\pi} = \frac{E_{\pi} - U_{\text{им}}}{I_{\text{м}}}, \quad (5-27)$$

где $U_{\text{им}}$ — напряжение источника питания при максимальном токе якоря.

Активное сопротивление двигателя $R_{\text{д}} = R - R_{\pi}$.

Полное индуктивное сопротивление цепи $L = T_{\text{д}}/R$.

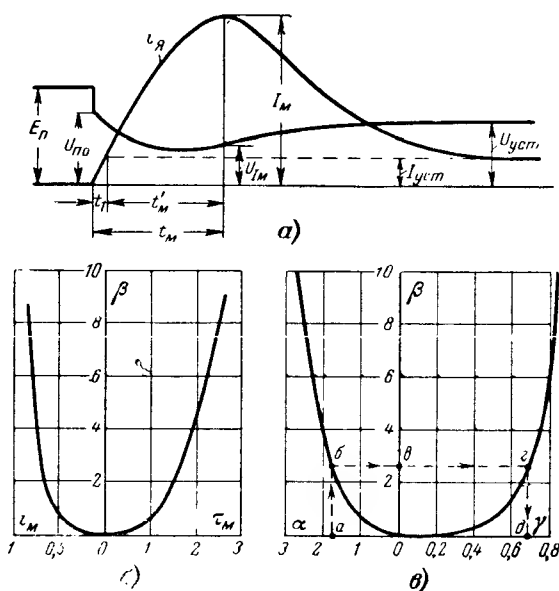


Рис. 5-11. Определение электромеханической постоянной времени, индуктивного сопротивления и махового момента якоря двигателя с помощью номограмм.

α — осциллограмма разгона привода; б, в — номограммы.

Индуктивность якорной цепи $L_{\text{д}}$ двигателя и источника питания L_{π} можно найти из отношения

$$\frac{E_{\pi}}{U_{\text{н0}}} = \frac{L_{\pi}}{L_{\text{д}}}. \quad (5-28)$$

Для определения махового момента привода требуется измерить напряжение, ток и скорость в установившемся режиме. Расчет ведется по формуле

$$GD^2 = \frac{4T_m}{R} \left(\frac{U_{уст} - R_d I_{уст}}{\frac{\pi n_{уст}}{30}} \right) \approx \approx 38 \frac{T_m}{R n_{уст}} (U_{уст} - R_d I_{уст}). \quad (5-29)$$

Постоянные времени нагревания частей электрической машины. В ряде случаев для поверочных расчетов мощности, для проверки системы вентиляции и допустимых моментов нагрузки требуется оценить перегрев отдельных частей машины в условиях эксплуатации. Температура оценивается с помощью термпар, термометров сопротивления или по изменению активных сопротивлений обмоток. Установившуюся температуру часто не удается определить, и поэтому замеры ведутся периодически через определенные промежутки времени. Полученное изменение температур дает представление о постоянных времени T нагрева деталей электрических машин.

Если внутри однородного тела длительное время выделяется постоянная по величине мощность и при этом условия теплоотдачи тела остаются неизменными, то температура тела изменяется по экспоненте

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right).$$

Здесь τ — превышение температуры тела над температурой окружающей среды в момент времени t ; τ_y — установившееся наибольшее превышение температуры тела над температурой окружающей среды; T — постоянная времени нагревания, характеризующая тепловую инерцию тела.

Электрическая машина представляет собой неоднородное тело; на отдельных участках выделяется разное количество тепла, а теплоотдача носит сложный характер. Если, например, рассматривать машину постоянного тока, то наибольшее количество тепла выделяется в якоре, от якоря тепловая энергия постепенно передается к станине, затем фундаментной плите, а также сочлененным с машиной механизмам. По мере повыше-

ния температуры станины и прилегающих массивных частей электропривода повышается температура якоря машины. В силу указанных факторов даже у двигателей малых мощностей установившаяся температура достигается за 4—8 ч, при этом меньшее время соответствует двигателям открытого типа. Если машина имеет принудительную вентиляцию, то степень нагревания якоря или ротора в меньшей степени зависит от температуры остальных частей.

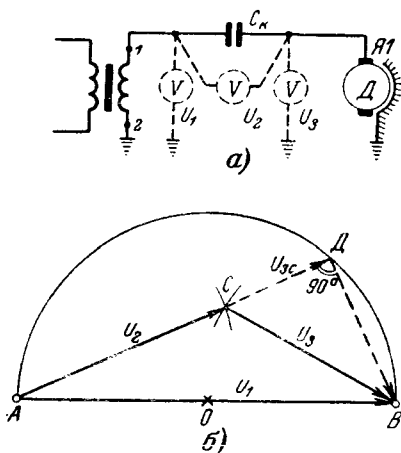


Рис. 5-12. Измерение емкости обмоток машин методом вольтметра.
а — схема; б — векторная диаграмма.

Кривые нагревания отдельных частей машины $\tau = f(t)$, снимаемые при тепловых испытаниях, могут значительно отличаться по форме от экспоненты, однако для частей машины все же вводится понятие постоянной времени; ее величина вычисляется графо-аналитическим методом (подкасательная в выбранной рабочей точке).

Емкость обмотки крупной машины по отношению к корпусу и другим обмоткам при наладке определяется в тех случаях, когда требуется подобрать испытательный трансформатор (см. гл. 1) или произвести контрольный расчет возможных перенапряжений. Измерение емкости может быть произведено методом вольтметра.

При измерении один вывод контролируемой обмотки (например, Я₁) через конденсатор C_k (рис. 5-12,а) присоединяется к зажиму 1

вторичной обмотки трансформатора, второй конец обмотки трансформатора 2 заземляется. Измеряются напряжения U_1 , U_2 , U_3 . Для повышения точности последующих расчетов величина емкости конденсатора C_k подбирается такой, чтобы напряжения U_2 и U_3 были по величине одного порядка. Используемый при опыте вольтметр должен иметь высокое внутреннее сопротивление (желательно не менее 5 ком на 1 в). На рис. 5-12,б приведена векторная диаграмма напряжений, построенных по данным опыта, произведенного с крупным приводным двигателем прокатного стана. По величине вектора U_{3c} , найденного графическим путем, рассчитывается искомая емкость обмотки якоря

$$C_{\pi} = C_k \frac{U_2}{U_{3c}} = 0,1 \frac{18}{9,4} = 0,192 \text{ мкф.}$$

Вектор $ДВ$ характеризует активную составляющую тока утечки.

5-4. Осциллографирование токов и напряжений

Современные методы анализа переходных режимов и установившихся периодических процессов базируются на осциллографировании токов и напряжений в цепях электрических машин. Методика осциллографирования затрагивает широкий круг вопросов [Л. 39, 40]. В данном разделе приведены только начальные рекомендации по подбору, включению и градуировке осциллографических гальванометров (шлейфов), а также использованию электронных осциллографов в практике работ по наладке электрических машин.

Работа с магнитоэлектрическими — шлейфовыми осциллографами. Контролируемые токи или напряжения, измеряемые в пропорциональных им величинах — миллиамперах, вызывают поворот рамки осциллографических гальванометров. Гальванометры построены по принципу магнитоэлектрических измерительных приборов: многовитковая рамка вращается в поле постоянного магнита и угол ее отклонения линейно пропорционален величине протекающего тока. Для демпфирования рамки чувствительных гальванометров помещают в масло. Частота собственных колебаний у гальванометров типовых осциллографов лежит в пределах 500—5 000 гц. Переходные и периодические процессы, анализируемые при наладке электрических машин, длятся обычно не менее 0,01 сек, и быстродействие гальванометров оказывается достаточным.

Осциллографирование при работах с машинами постоянного тока. Подбор вибраторов производится по закону Ома для постоянного тока.

При осциллографировании напряжений рекомендуется выбирать гальванометр по возможности более грубый, но с учетом имеющихся добавочных сопротивлений.

Пример. Максимальное значение контролируемого напряжения $U_m = \pm 800$ в. У осциллографа типа Н102 (или МП02) выбираем гальванометр № 5 (типа Н135-2) с данными: $a = 2$ мм/ма; 4 ом; $I_{дон} = 10$ ма, допустимая частота 0—2 000 гц.

Принимаем максимальное отклонение (в одну сторону) $H = 10$ мм, тогда

$$i_{раб} = \frac{H}{a} = 5 \text{ ма.}$$

Добавочное сопротивление к шлейфу

$$R_d = \frac{U_m}{i_p} = \frac{800 \cdot 10^3}{5} = 160 \text{ ком.}$$

Во избежание перегорания гальванометра часть добавочного сопротивления должна представлять собой невыключаемое внешнее сопротивление

$$R_{д.в} = \frac{U_m}{I_d} = \frac{800 \cdot 10^3}{10} \approx 80 \text{ ком.}$$

Небольшие токи, до 10 а, удобно осциллографировать, пользуясь набором шунтов и переключателей,

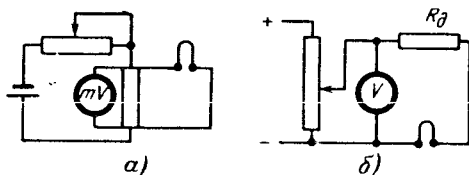


Рис. 5-13. Определение масштабов осциллограмм методом нагрузки гальванометров. а — градуировка гальванометров для осциллографирования токов; б — то же для осциллографирования напряжений.

имеющихся в приставке осциллографа. При больших токах, порядка сотен и тысяч ампер, приходится использовать стандартные шунты на 45—75 мв из схемы электропривода.

Выбирая гальванометр, следует учитывать знак переменный сигнал и неполное использование шунтов по току; напряжение, имеющееся на шунте, составляет обычно не более 10—15 мв. Достаточное отклонение (5—10 мм) при столь малом напряжении могут дать только гальванометры высокой чувствительности, например, Н135-0,6 и Н135-0,9.

При питании вибраторов от шунтов резко сказывается сопротивление подводящих проводов. Масштаб отклонения зайчиков вибраторов Γ на экране и на пленке (1 мм — m а или 1 мм — n в), найденный путем расчета, рекомендуется проверить методом нагрузки от постороннего источника питания (рис. 5-13, а, б).

Для потенциального отделения измеряемого тока от гальванометра осциллографа и для увеличения сигнала могут применяться трансформаторы постоянного тока на повышенной частоте или магнитные усилители, подключаемые к шунтам.

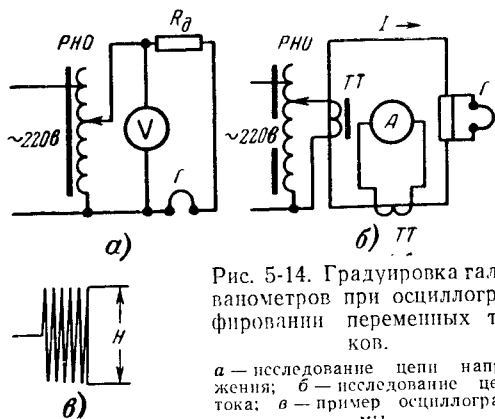


Рис. 5-14. Градуировка гальванометров при осциллографировании переменных токов.

а — исследование цепи напряжения; б — исследование цепи тока; в — пример осциллограммы.

Осциллографирование при работе с машинами переменного тока. При осциллографировании переменных напряжений добавочное сопротивление R_d выбирается с учетом того, что отклонение гальванометра Γ будет определяться не действующим, а двойным амплитудным значением измеряемого напряжения. Токи в цепях статоров машин удобно осциллографировать с помощью трансформаторов тока $ТТ$ (рис. 5-14), во вторичной цепи которых включены обычные шунты на 3—5 а. Градуировку гальванометров цепей напряжения рекомендуется производить с помощью автотрансформатора (типа РНО-2-250), а градуировку гальванометров цепей тока — путем пропуска через шунт переменного тока от трансформатора тока $ТТ$. Масштаб напряжения U (или тока I) опреде-

ляется по амплитуде H колебаний зайчиков и измеренному напряжению

$$n = \frac{2\sqrt{2}U}{H}, \text{ в/мм.}$$

Когда на одной пленке записывается несколько электрических величин и скорость пленки не превышает 50 мм/сек, накладывающиеся синусоиды затемняют друг друга. В этом случае рекомендуется выпрямить, а затем отфильтровать синусоидальные величины. На

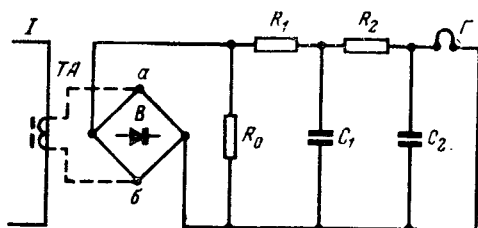


Рис. 5-15. Схема фильтра для осциллографирования напряжений или токов.

рис. 5-15 приведена схема фильтра для осциллографирования напряжений или токов. В последнем случае фильтр присоединяется зажимами а--б к трансформатору тока ТА с ненасыщенным сердечником. Для того чтобы фильтр мало искажал регистрируемый переходный процесс, постоянная времени фильтра должна быть в 5—15 раз меньше длительности контролируемого отрезка времени. Так, например, для осциллографирования процесса ускорения двигателя, продолжающегося 0,3—1 сек, можно применить фильтр с постоянной $T = 0,02 \div 0,1$ сек. В приведенной схеме $T = R_1 C_1 + R_2 C_2$.

Приняв $R_0 = R_1 = R_2 = 5 \text{ ком}$ и $C_1 = C_2 = 2 \text{ мкф}$, получим $T = 2RC = 2 \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0,02 \text{ сек}$.

На рис. 5-16 приведены осциллограммы изменения тока, напряжения статора и скорости асинхронного прокатного двигателя при входе металла в валки. Осциллограммы на рис. 5-16, в и г сняты с использованием фильтров; при отсутствии фильтров (отключены конденсаторы C_1 и C_2) осциллограмма имеет вид, приведенный на рис. 5-16, б. Действие фильтров RC может быть рассчитано с помощью графиков, представленных на рис. 4-18.

Для более эффективного сглаживания пульсаций рекомендуется применять фильтры с двумя и более звеньями (см. рис. 5-15). Постоянная времени многозвенного фильтра T_{Φ} определяется суммой постоянных отдельных звеньев, а общий коэффициент сглаживания ζ_{Φ} — произведением коэффициентов каждого звена

$$T_{\Phi} = T_1 + T_2 + \dots + T_k; \quad \zeta_{\Phi} = \zeta_1 \zeta_2 \dots \zeta_k.$$

Действие фильтров может быть определено по характеристикам затухания (рис. 5-17). По горизонтальной

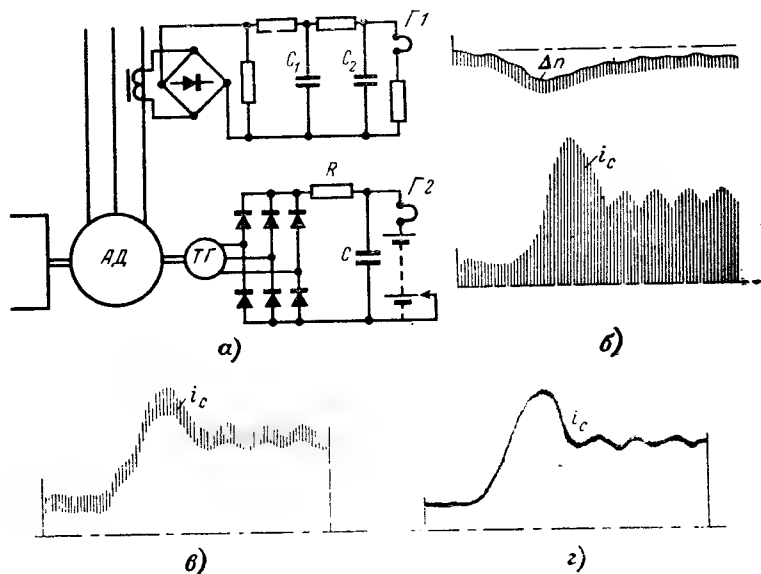


Рис. 5-16. Осциллограммы асинхронного прокатного электропривода, снятые при входе металла в валки.

а — схема включения гальванометров; б — гальванометр Г1 включен через выпрямитель без фильтра; в, г — гальванометры включены через Ш-образные фильтры RC.

оси, как принято при оценке фильтров, отложена относительная частота $\omega RC = \omega T$ в логарифмическом масштабе; по вертикали отложен показатель затухания

$$\alpha = 20 \lg \frac{\Delta U'}{\Delta U''} = 20 \lg \zeta, \quad \text{дб},$$

где $\Delta U'$, $\Delta U''$ — амплитуды сравниваемых пульсаций до и после фильтра.

Форму периодически повторяющихся напряжений и токов у машин переменного тока, а также периодические пульсации напряжений тахогенераторов удобно наблюдать с помощью электронного осциллографа. Малогабаритные осциллографы должны стать приборами индивидуального пользования всех наладчиков. Осциллографы с катодными трубками обладающими свойством после-свечения (сохранения следа зайчика в течение порядка 3 сек) могут быть использованы для наблюдения (и фото-графирования) переходных процессов, длящихся еди-

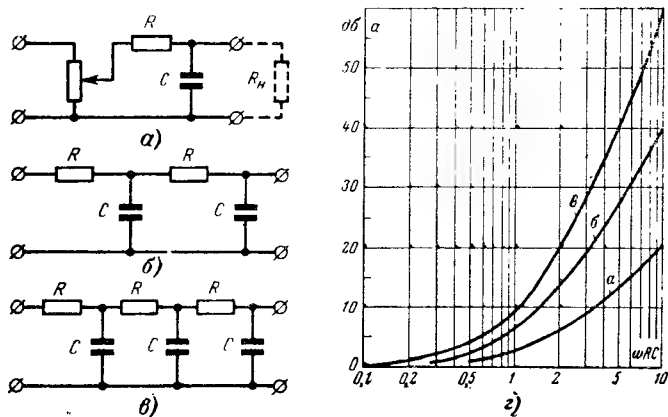


Рис. 5-17. Схемы фильтров и характеристики затухания. а — однозвенный RC-фильтр; б — двухзвенный RC-фильтр; в — трехзвенный RC-фильтр; з — характеристики затухания, соответствующие схемам а, б, в.

ницы секунд, например для подбора желаемой диаграммы токов при пуске двигателя. С этой целью для контроля постоянной составляющей сигнала из работы выводится усилитель переменного тока, а время развертки увеличивается путем подключения конденсаторов. На рис. 5-18,а показана схема подачи на катодный осциллограф одновременно двух сигналов через контакты поляризованного реле типа РП5. Если катушку реле питать от источника переменного тока с частотой 50 гц, то его контакты будут переключаться и на экране можно наблюдать сразу два переходных процесса. Примерная осциллограмма пуска двигателя, срисованная с экрана трубки типа 13ЛО36, показана на рис. 5-18,б; линии после-свечения состоят из отдельных точек.

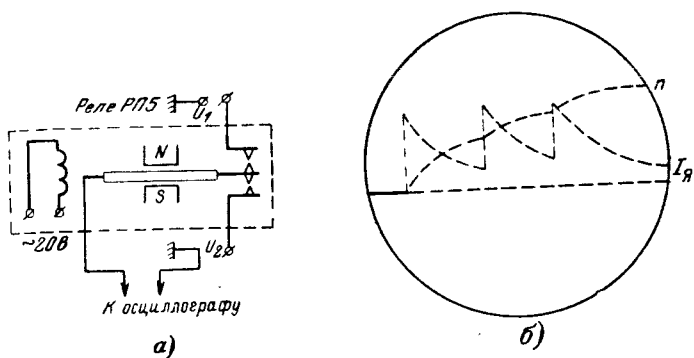


Рис. 5-18. Получение кривых двух сигналов на электронном осциллографе.

а — включение контактов поляризованного реле; *б* — осциллограммы тока и скорости электропривода.

5-5. Осциллографирование скорости и ускорений

Контроль скорости осуществляется с помощью различных тахогенераторов (см. § 4-3), стационарно смонтированных на приводах. Для осциллографирования удобнее пользоваться тахогенераторами постоянного тока. В качестве датчиков скорости могут быть приспособлены небольшие машины, присоединяемые к вращающимся валам вручную — подобно тахометрам.

При фрикционном подсоединении в случае резких изменений скорости возможно проскальзывание тахогенератора; кроме того, в пределах одного оборота показания тахогенератора зависят от углового и параллельного смещений его оси. Среднее значение показаний не зависит от положения оси вала.

Осциллографирование скорости принципиально не отличается от регистрации напряжений генератора, имеющего постоянную скорость, но переменные возбуждение и нагрузку. Во многих случаях при работе с автоматическими регуляторами требуется оценить весьма незначительные изменения скорости, составляющие только доли процента. Такие небольшие изменения контролируемой величины могут быть оценены только дифференциальным путем. Схема включения аппаратуры приведена на рис. 4-16. Как было указано в § 4-3, для предохранения гальванометров при работе с дифференциальной схемой требуется особая осторожность. На рис. 4-16,б показана осциллограмма изменения скорости

Для прокатного двигателя в момент входа металла в валки. Двигатель питается от управляемого ртутного выпрямителя. На рис. 4-16, в дана та же осциллограмма, но при включении конденсатора C , сглаживающего зубцовые пульсации измеряемого напряжения.

Для повышения чувствительности и защиты вибратора на входе светолучевого осциллографа может быть включена электронная приставка, являющаяся усилителем постоянного тока с максимальной отсечкой. В прак-

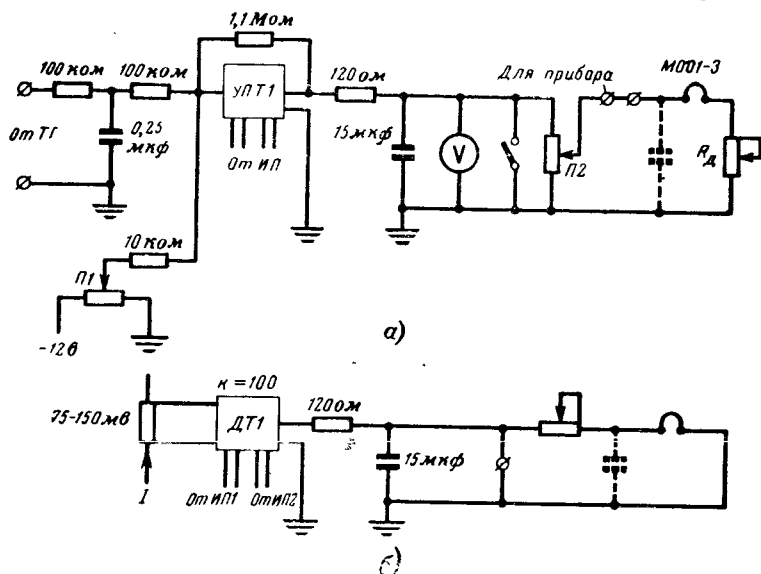


Рис. 5-19. Схемы осциллографирования скорости при помощи стандартных усилителей системы УБСР.

тике наладочных работ для осциллографирования малых измерений скорости успешно используются стандартные усилительные блоки системы УБСР (рис. 5-19). Напряжение от тахогенератора ТГ (100 ком, 0,25 мкф) и сопротивление 100 ком подается на вход линейного электронного усилителя типа УПТ1. На выходе усилителя имеется дополнительный низковольтный фильтр RC (120 ом, 15 мкф); постоянные фильтров не превышают 0,025 сек. На вход УПТ1 через резистор 10 ком подается также стабилизированное независимое напряжение. При установившейся скорости с помощью потенциометра П1 создается баланс сравни-

ваемых напряжений; контроль уровня выходного напряжения производится по вольтметру V . Схема дает возможность оценить изменения выходного напряжения, усиленные в 50—200 раз. Гальванометр осциллографа (например, типа М001.3) включается через потенциометр $P2$ и резистор R_d .

На рис. 5-19,б показано использование стандартного усилителя типа ДТ1 для осциллографирования тока двигателя.

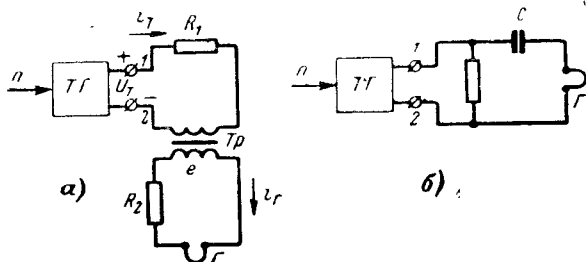


Рис. 5-20. Схемы включения осциллографических гальванометров при определении ускорений.

Изменение скорости во времени dn/dt определяет величину ускорений. Ускорения могут быть рассчитаны по тангенсам касательных к кривой скорости. Осциллограмма ускорений снимается при помощи дифференцирующего трансформатора или емкости (рис. 5-20). В схеме с трансформатором Tr большая часть (90—95%) напряжения ТГ должна падать на добавочном сопротивлении R_1 . При этом величина контролируемой скорости n и ее изменение будут пропорциональны току i_T

$$U_T = K_1 n; \quad i_T = \frac{U_T}{R_1} K_2 n; \quad \frac{dn}{dt} = K_3 \frac{di_T}{dt},$$

где K_1, K_2, K_3 — коэффициенты пропорциональности.

Электродвижущая сила e вторичной обмотки трансформатора определяется изменением потока Φ или тока i_T

$$e = K_4 \frac{d\Phi}{dt} = K_5 \frac{di_T}{dt}.$$

Контролируемый гальванометром I ток пропорционален изменению скорости

$$i_{\Gamma} = K_6 \frac{c}{R_2} = K_{\Gamma} \frac{dn}{dt},$$

где K_6 , K_{Γ} — коэффициенты передачи.

Градуировку гальванометра ускорения наиболее точно можно произвести путем подачи линейно возрастающего напряжения на зажимы 1—2. Для этой цели удобно использовать интегратор, включаемый по схеме

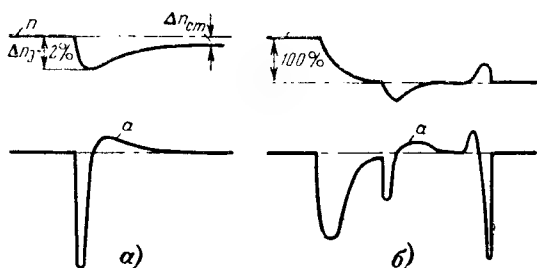


Рис. 5-21. Осциллограммы скоростей и ускорений механизмов с ударным приложением нагрузки.

a — толкатель блюминга; b — зажим коксовыткателя; n — скорость; a — ускорение.

рис. 5-8. Можно воспользоваться также кривой намагничивания генератора во времени $U_{\Gamma} = f(t)$, производя опыт включения обмотки возбуждения на постоянное напряжение. При использовании отсоединенного тахогенератора градуировка гальванометра может быть произведена с помощью падающего груза (см. рис. 5-5, a). Искомое ускорение a в данном случае находится расчетным путем

$$a = \frac{U_{\text{м}}}{t_1} = \frac{2H}{t_1^2}.$$

На рис. 5-21 для иллюстрации даны примерные осциллограммы скоростей n и ускорений a механизмов толкателя блюминга и зажима коксовыткателя.

5-6. Измерение скорости и скольжения

Для измерения скоростей вращения электрических машин используются механические тахометры, тахогенераторы, счетчики импульсов и различные стробоскопические устройства.

Обычные механические тахометры, периодически контролируемые на испытательных установках, имеют погрешность показаний 1—3%. При известном опыте с помощью тахометра можно уловить изменение скорости на 0,5%. Тахогенераторы в комплекте со щитовыми измерительными приборами класса 1 дают точность показаний 1,5—3%; при тщательной градуировке и работе с лабораторными вольтметрами класса 0,2 может быть получена точность показаний до 0,5%.

По стабильности характеристик наиболее совершенными являются тахогенераторы индукторного типа, так как на их показания мало влияют величины возбуждения, температура, магнитные поля двигателя и износ [Л. 22]. В тех случаях, когда требуется иметь данные о величине скорости вращения с погрешностью не более 0,1—0,5%, следует прибегать к счетным методам измерения [Л. 37].

При производстве наладочных работ, как правило, величины скорости достаточно оценивать с точностью до 1—2%, но часто требуется определить статические посадки скорости, составляющие доли процента. Такие величины могут быть измерены только дифференциальным методом (см. рис. 4-16 и 5-19).

Можно рекомендовать освоение стробоскопических методов измерения скоростей. Имеются различные типовые стробоскопы (см. § 1-4); стробоскопическое измерение может быть выполнено также простыми средствами, всегда имеющимися в распоряжении наладчиков. Для этого на валу двигателя укрепляется диск с нанесенными концентрическими кольцами (рис. 5-22), разделенными на темные и светлые участки. Если при вращении двигателя освещать диск неоновой лампой или иной лампой, вспыхивающей с частотой напряжения сети, то неподвижными будут казаться те кольца, у которых при данной скорости темные и светлые участки чередуются с частотой сети (или с частотой кратной, т. е. в 2—3 раза большей чем частота сети).

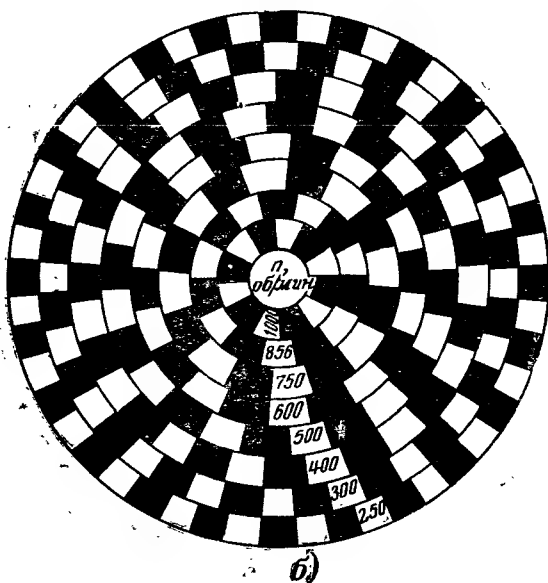
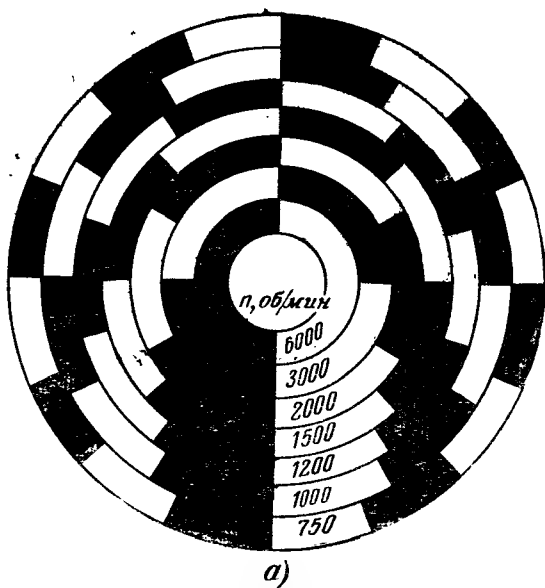


Рис. 5-22. Диски для измерения скорости стробоскопическим методом.

а — при скорости вращения вала до 6 000 об/мин; б — то же, но до 856 об/мин.

Скорость вращения вала n , соответствующая кажущемуся неподвижному состоянию кольца, может быть вычислена по соотношению

$$n = 2 \frac{2f60}{K} = \frac{6000}{K},$$

где f — частота сети, равная 50 гц;

K — число затемненных участков данного кольца.

Для получения более четкого изображения неоновую лампу НЛ целесообразно включать через небольшой насыщающийся трансформатор НТ и вентиль B по схеме, приведенной на рис. 5-23, а.

При таком включении длительность горения лампы значительно меньше длительности паузы (рис. 5-23, б). В этом случае скорость вращения вала n определяется по формуле $n = 3000/K$. Во избежание ошибки порядок величины скорости рекомендуется определить с помощью тахометра.

Если нет возможности отрегулировать скорость привода таким образом, чтобы одно из колец казалось неподвижным, то уточнение можно внести, подсчитав, сколько затемненных участков одного из колец пройдет мимо неподвижной точки за определенный отрезок времени. Для уяснения рассмотрим следующий пример.

Пример. Пусть при наблюдении за освещаемым неоновой лампой диском (рис. 5-22, а) мы видим, что наиболее медленно движется шестое кольцо (считая от центра) с шестью затемненными участками; кольцо вращается в сторону вращения вала и за время $t = 10$ сек мимо неподвижной точки проходит $N = 32$ затемненных участка данного кольца. Скорость вала вычисляется по формуле

$$n = \frac{120f}{K} + \frac{60N}{Kt} \quad (5-30)$$

■ для данного случая равна:

$$n = \frac{120 \cdot 50}{6} + \frac{60 \cdot 32}{6 \cdot 10} = 1032 \text{ об./мин.}$$

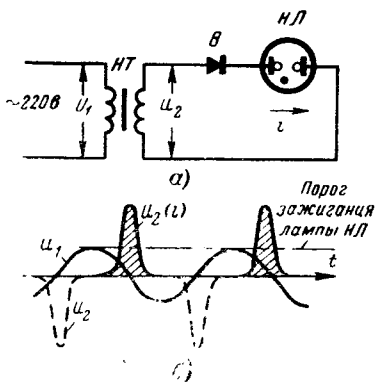


Рис. 5-23. Использование неоновой лампы для освещения диска стробоскопа.

а — схема включения; б — характеристики напряжений на участках схемы.

Стробоскопический метод удобен для определения скольжения асинхронных двигателей по отношению к синхронной скорости. Скольжение s лежит обычно в пределах 1—5%. При определении скольжения вместо применения специального диска достаточно на поверх-

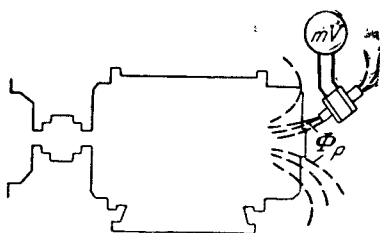


Рис. 5-24. Измерение скольжения ротора асинхронного двигателя с помощью индукционной катушки.

ность соединительной муфты параллельно оси равномерно нанести мелом ряд полос по числу полюсов двигателя.

Во время вращения двигателя нанесенные на муфте меловые полосы совершенно незаметны, но при подсвечивании неоновой лампой создается впечатление, что они медленно вращаются в сторону, противоположную ходу ротора. Скорость вращения полос пропорциональна разности между частотой мигания неоновой лампы и скоростью вращения муфты двигателя.

Определив время t , сек, за которое мимо неподвижной точки проходит m полос, можно подсчитать скольжение ротора s

$$s\% = \frac{m}{2tf} \cdot 100, \quad (5-31)$$

где f — частота сети.

При нормальной промышленной частоте $f=50$ гц $s\% = m/t$.

Пример. Допустим, что за 12 сек мимо неподвижной точки прошло 30 полос. Тогда $s = \frac{30}{12} = 2,5\%$.

Второй способ определения величины скольжения основан на контроле скорости вращения потоков рассеяния ротора Φ_r , которые с частотой, пропорциональной скольжению, пересекают витки индукционной катушки (рис. 5-24). Для проведения испытания к выводам катушки подключается чувствительный милливольтметр (желательно с нулем посредине шкалы); катушка располагается у конца вала ротора, а затем путем поворачивания ее в разные стороны отыскивается положение, при котором наблюдаются максимальные колебания

стрелки прибора. По числу полных колебаний K за t сек рассчитывается величина скольжения

$$s^0/o = \frac{K}{t_f} \cdot 100; \quad \text{при } f = 50 \quad s^0/o = \frac{2K}{t}.$$

Удобно отсчитать 50 полных колебаний и по секундомеру засечь время, тогда

$$s^0/o = \frac{1}{t} 100.$$

В качестве индукционной катушки можно использовать катушку реле или контактора постоянного тока, имеющую 10—20 тыс. витков (или намотать катушку с числом витков не менее 3 000). Внутри катушки для усиления магнитного потока вставляется сердечник, набираемый из нескольких полос трансформаторной стали. Метод индукционной катушки применим для всех видов машин и является наиболее удобным.

У двигателей с фазным ротором, помимо способов, описанных выше, скольжение может быть определено с помощью магнитоэлектрического амперметра, включаемого в одну из фаз ротора, а при наличии невыключаемого сопротивления — с помощью вольтметра, присоединяемого к кольцам ротора. Рекомендуются применять приборы с двусторонней шкалой. Скольжение рассчитывается по числу полных колебаний стрелки прибора, так же как при методе с индукционной катушкой.

Литература

1. Пиотровский Л. М., Электрические машины, Госэнергоиздат, 1960.
2. Кулебакин В. С., Испытание электрических машин и трансформаторов, ОНТИ, 1935.
3. Жерве Г. К., Промышленные испытания электрических машин, Госэнергоиздат, 1959; изд-во «Энергия», 1968.
4. Петров Г. Н., Электрические машины, изд-во «Энергия», 1968.
5. Пиотровский Л. М., Васютинский С. Б., Несгорова Е. Д., Испытание электрических машин, Госэнергоиздат, 1960.
6. Гемке Р. Г., Неисправности электрических машин, Госэнергоиздат, 1960.
7. Тун А. Я. и Иванов А. О., Наладка электрических машин электроприводов, Госэнергоиздат, 1963.
8. Важинов А. И., Электрические машины, изд-во «Энергия», 1968.

9. Справочник по электроустановкам промышленных предприятий, т. 3, Наладка электроустановок, изд-во «Энергия», 1965.
10. Кофман К. Д., Справочник электромонтера, изд-во «Энергия», 1967.
11. Алексеев А. Г., Баюшкин С. Н., Маркелов В. В., Небесный А. Д., Справочник по специальным работам для производителя электромонтажных работ, Стройиздат, 1968.
12. Дренов П. В., Справочник по ремонту электрических машин, изд-во «Техника», 1964.
13. Электротехнический справочник, под ред. профессоров МЭИ, т. 3, изд-во «Энергия», 1966.
14. Бондаренко В. П., Плетник М. И., Справочник электромонтажника, изд-во «Будівельник», 1967.
15. Справочные данные по электрооборудованию, т. 1 и 2, Электрические машины, ВНИИметмаш, изд-во «Энергия», 1964, 1965.
16. ГОСТ 183-66, Машины электрические, общие технические требования, методы испытаний.
17. Жерве Г. К., Руководство для электромонтеров по испытанию электрических машин, Госэнергоиздат, 1955.
18. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), гл. 1-1 «Общие правила», гл. 1—8 «Объемы и нормы приемосдаточных испытаний», изд-во «Энергия», 1966.
19. Сборник правил техники безопасности при производстве электромонтажных работ, изд-во «Энергия», 1964.
20. Завалишин Д. А., Электрические машины малой мощности, Госэнергоиздат, 1963.
21. Чечет Ю. С., Электрические микромашины автоматических устройств, изд-во «Энергия», 1964.
22. Тун А. Я., Тахогенераторы для систем управления электроприводами, изд-во «Энергия», 1966.
23. Арменский Е. В., Фалк Г. Б., Электрические микромашины, изд-во «Высшая школа», 1968.
24. Андреев Б. П., Сабинин Ю. А., Основы электропривода, Госэнергоиздат, 1963.
25. Васильев С. Е., Забарский Б. М., Забокрицкий Е. И., Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики, изд-во «Наукова думка», 1966.
26. Минин Г. П., Мегомметр, изд-во «Энергия», 1966.
27. Правила технической эксплуатации и безопасности обслуживания электроустановок промышленных предприятий, изд. 3, изд-во «Промінь», 1967.
28. Гаврилов И. В., Наладка систем управления ртутными преобразователями, изд-во «Энергия», 1968.
29. Зеленев А. Б., Тертычников В. Н., Гулякин В. Г., Электропривод механизмов прокатных станов, Металлургиздат, 1966.
30. Загальский Л. Н. и Зильберблат М. Э., Частотный анализ систем автоматизированного электропривода, изд-во «Энергия», 1968.
31. Пышкало В. Д., Акимов Л. В., Шамрай В. П., Оптимальные по быстродействию промышленные электроприводы, изд-во «Энергия», 1967.
32. Маликов С. Ф., Тюрин Н. И., Введение в метрологию, изд-во стандартов, 1965.
33. Фремке А. В. (ред.), Электрические измерения, Госэнергоиздат, 1963.

34. Кудряков В. В. Электрические машины. Изд-во ЦИИИ-944. 1968.
35. Лавинский В. П. Пятикратный трансформатор. Профтехиздат, 1962.
36. Лавинский В. П. Пятикратный трансформатор. Изд-во ЦИИИ-944. 1968.
37. Лавинский В. П. Электрические измерения механических величин. Изд-во «Энергия», 1969.
38. Козакинский К. Б. Специальные методы электрических измерений. Госэнергоиздат, 1963.
39. Соловьев В. Я. Осциллографические измерения. Изд-во «Энергия», 1968.
40. Павловский В. А. Современный осциллограф. Изд-во «Энергия», 1969.
41. Зинберман Г. З. Методы измерения электроприводов. Госэнергоиздат, 1962.
42. Виноградов С. Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд-во «Энергия», 1967.
43. Боронов Ю. А., Суворов Г. В., Шестаков Ю. С. Экспериментальное определение параметров и частотных характеристик автоматических электроприводов. Изд-во «Энергия», 1969.
44. Баранов Г. Г. Курс теории механизмов и машин. Машиностроение, 1978.
45. Чернявский С. А. (ред.). Краткий справочник машиностроения. Изд-во «Машиностроение», 1966.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	5
Глава первая Общие указания по наладке всех видов электрических машин	7
Глава вторая Машины постоянного тока	61
Глава третья Машины переменного тока	103
Глава четвертая Управляющие и измеряющие электрические машины	129
Глава пятая Постоянные электрических машин и методы специальных измерений	159
Литература	191

Цена 55 коп.